



Márcio Joaquim da Cunha Lopes

Licenciado

Projecto e Implementação de um Sistema para Electrofiação Controlado por Computador

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: José Manuel Fonseca,
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Co-orientador: Maria Helena Figueiredo Godinho,
Professora Auxiliar com Agregação, FCT/UNL

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor Adolfo Steiger Garção
Arguentes:	Prof. Doutor Fernão Vístulo de Abreu
	Prof. Doutor André Damas Mora
Vogais:	Prof. Doutor José Manuel Fonseca
	Prof. Doutora Maria Helena Figueiredo Godinho



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2012



Universidade Nova de Lisboa

Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Electrotécnica

Projecto e Implementação de um Sistema para Electrofição Controlado por Computador

Por

Márcio Joaquim da Cunha Lopes

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor José Manuel Fonseca

Co-Orientador: Professora Doutora Maria Helena Godinho

Lisboa

Março, 2012



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova pela oportunidade de fazer parte desta excelente escola e pela afectividade ganha com todas as pessoas que fazem parte desta instituição, o meu muito obrigado.

Aos meus orientadores Prof. José Manuel Fonseca do Departamento de Engenharia Electrotécnica e à Prof. Maria Helena Godinho do Departamento de Ciências dos Materiais pelo auxílio e orientação, pela disponibilidade e pelas valiosas ideias que foram surgindo ao longo de todo este projecto, deixo toda a gratidão. A vossa orientação permitiu despertar em mim um novo gosto pela Nanotecnologia e toda a ciência associada e, por isso, o meu muito obrigado.

Ao professor André Mora deixo também o meu obrigado por todo o apoio, orientação, disponibilidade e encorajamento durante todo este período.

Também gostaria de deixar umas palavras de agradecimento ao Grupo dos Materiais poliméricos e Mesomorfos por me terem adoptado como membro integrante da equipa e terem a paciência, motivação e entusiasmo para me ajudarem a superar os mais diversos desafios.

Este projecto foi suportado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projecto PTDC/CTM/101776/2008 e, por isso, deixo o meu agradecimento à instituição.

Aos meus companheiros de curso, sem eles a vida universitária não tem qualquer sentido, as brincadeiras, as saídas à noite, o apoio e a entreaajuda de todos os colegas de curso, fazem deles uma parte importantíssima de toda a formação académica. Um especial abraço para os meus grandes amigos Carlos Lopes, Fátima Oliveira, Flávio Ferreira, João Virote, Inês Besugo, Isa Broncas e Rui Pinhal.

Não poderia acabar sem deixar o mais valioso agradecimento para os meus pais, tendo sido as pessoas fundamentais durante toda a minha formação. Um muito obrigado pelo ânimo que me transmitiram, pelo esforço efectuado para que eu tenha sucesso na vida e também pelo carinho demonstrado ao longo de todos estes meus anos de vida. Pretendo também agradecer aos meus irmãos Rodrigo e Sónia e a toda a restante família.

Por fim, tenho o prazer de dedicar esta dissertação ao meu afilhado, Diogo Lopes.

Márcio Lopes

Universidade Nova de Lisboa

Março 2012

RESUMO

A electrofiação é um método altamente versátil para processar soluções de polímeros ou de outros fluidos complexos e transformá-los em fibras cujo diâmetro varia nas escalas micrométrica e nanométrica[1]. Embora a electrofiação se baseie num princípio simples, a sua implementação é bastante complexa dado que depende dos materiais utilizados, da técnica aplicada e de uma multiplicidade de parâmetros que condicionam o seu funcionamento[2]. Neste trabalho é adoptada uma nova abordagem ao equipamento para produção de nanofibras orgânicas e/ou inorgânicas e também nanopartículas por electrofiação. Para isso, foi desenvolvido novo *hardware* e *software* que permite controlar a posição 2D e 3D do alvo (ou colector), assim como a rotação deste.

Este trabalho apresenta o processo de electrofiação descrevendo o seu comportamento através dos parâmetros intervenientes nesta técnica, assim como uma nova metodologia para a produção contínua de micro e nanofibras de soluções de polímeros como alternativa à configuração convencional. O foco do trabalho está na automatização e controlo do colector do processo, de forma a possibilitar novas experiências nas áreas dos polímeros.

A metodologia proposta envolve a construção de um sistema de eixos tridimensional para o posicionamento do alvo possibilitando o controlo manual e automático através de um computador pessoal.

O protótipo desenvolvido permite o controlo preciso da deposição das fibras, gerando desta forma novos padrões geométricos nas membranas não-tecidas. Estes novos padrões podem vir a estar na origem de novas aplicações para os materiais desenvolvidos no laboratório de materiais poliméricos e mesomorfos onde o protótipo desenvolvido se encontra em utilização.

PALAVRAS-CHAVE: Electrofiação, nanofibras, automação, colectores, parâmetros do processo.

ABSTRACT

Electrospinning is a highly versatile method to process solutions or melts, mainly of polymers, into continuous fibers with diameters ranging from a few micrometers to nanometers[1]. The technique has a straightforward principle but is a rather intricate process that depends on a multitude of molecular, process and technical parameters[2]. In this work a new approach is given to electrospinning machinery and production of a wide variety of organic and/or inorganic nanofibers and nanoparticles. New hardware and software was developed in order to control the target 3D and 2D position.

This paper presents the electrospinning process describing its behavior through the parameters involved in this technique, as well as a new method for continuous production of micro and nanofibers of polymer solutions as an alternative to conventional configuration. The focuses of this study are the automation of the target and control the process so as to allow further research in areas like polymers, melts and scaffolds.

The method proposed involves the construction of a three-dimensional coordinate system to allow manual and automatic target positioning, through a user-friendly interface.

The developed prototype allows the precise control of the fibers deposition, which generates new geometrical patterns in the nonwoven membranes. These new designs can be at origin of new scaffolds and this will be further investigated in future work.

KEYWORDS: Electrospinning, nanofibers, automation, collectors, process parameters.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABELAS	xix
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	xxi
Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objectivos	4
1.3 Enquadramento	4
1.4 Organização.....	5
Capítulo 2. Electrofiação.....	7
2.1 Princípios básicos	7
2.2 Revisão histórica	9
2.3 História Recente	11
2.3.1 Equipamentos disponíveis na actualidade.....	13
2.4 Aplicações	14
2.4.1 Aplicações Biomédicas.....	15
2.4.2 Indústria Farmacêutica e Cosmética.....	16
2.4.3 Aplicações Têxteis.....	16
2.4.4 Aplicações Energéticas e Electrónicas	17
2.4.5 Filtragem.....	17
2.5 Polímeros utilizados para electrofiação	18
2.5.1 Polímeros Naturais e Sintéticos.....	19
2.6 Efeito dos diversos parâmetros na electrofiação	20
2.6.1 Parâmetros da Solução	21
2.6.2 Parâmetros do Processo.....	23
2.6.3 Parâmetros do Ambiente.....	26
2.7 Tipos de montagens	26

2.7.1	Tipos de agulhas	27
2.7.2	Tipo de colectores	27
2.7.3	Configuração do campo eléctrico	30
2.8	Várias formas de produzir nanofibras.....	31
2.8.1	Desenho de fibras (<i>Drawing</i>)	32
2.8.2	Síntese com Molde (<i>Template Synthesis</i>)	33
2.8.3	Separação de Fases (<i>Phase Separation</i>).....	34
2.8.4	Automontagem (<i>Self-Assembly</i>)	34
Capítulo 3.	Fundamentos Teóricos	37
3.1	Motores Passo-a-passo e o seu Controlo	37
3.1.1	Tipos de Motores de Passo.....	38
3.1.2	Motor de Relutância Variável.....	39
3.1.3	Motor Híbrido	41
3.1.4	Modos de alimentação dos motores passo-a-passo	43
3.2	Binário	46
3.3	Modulação por Largura de Pulsos (PWM)	46
3.4	Motor de CC sem escovas	47
3.5	Microcontrolador	50
3.5.1	Arduino.....	51
3.6	Sensores Ópticos (Sensores de fim de curso)	53
Capítulo 4.	Projecto e Implementação	55
4.1	Modelo de Arquitectura	55
4.2	Equipamento disponível não sujeito a alterações	56
4.2.1	Bomba de Infusão.....	57
4.2.2	Fonte de Alta Tensão	57
4.3	Hardware seleccionado.....	58
4.3.1	Sistema de Eixos Cartesiano	58
4.3.2	Motores Passo-a-passo	60
4.3.3	Motor de Rotação	61
4.3.4	Circuito de Sensores.....	63
4.3.5	Fontes de Alimentação.....	64
4.4	Protótipo Implementado	65
4.5	Circuito Integrado com o Microcontrolador	67
4.6	Programação do Microcontrolador Arduino	70
4.6.1	Comunicação Arduino – Interface PC	73

4.7 Interface Gráfica	75
Capítulo 5. Ensaaios e Resultados.....	81
5.1.1 Fibras <i>Janus</i>	81
5.1.2 Biobaterias	83
Capítulo 6. Conclusões e Trabalho Futuro.....	85
6.1 Conclusões	85
6.2 Propostas de Trabalho Futuro.....	87
Capítulo 7. Bibliografia	89
Capítulo 8. Anexos	95
8.1 Anexo I – Código-fonte do microcontrolador Arduino	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática do cone de Taylor. Devido à aplicação do campo eléctrico, existe uma acumulação de cargas na superfície da gota. Evolução da gota de solução ao superar a tensão superficial inerente e formação do jacto fibroso[4].....	8
Figura 2.2 – Diagrama esquemático da montagem básica de electrofiação[2].	9
Figura 2.3 – Número (n) de publicações científicas e patentes por ano (1994-2006) com a palavra-chave “electrospinning” (fonte: SciFinder Scholar adaptado de [4]).....	12
Figura 2.4 – Montagem básica para o processamento em laboratório[30].	12
Figura 2.5 – Equipamento para produção de nano fibras disponível na Nabond[31].	13
Figura 2.6 – Um dos equipamentos disponíveis para aquisição na empresa Fuenche.....	14
Figura 2.7 – Equipamento ES1a disponível na Electrospinz.	14
Figura 2.8 – Aplicações da Electrofiação em diferentes sectores.....	15
Figura 2.9 – Tipo de montagem com eléctrodos em oposição de 90 graus. Fibras obtidas em diferentes zonas da área de deposição[66].....	29
Figura 2.10 – Múltiplas seringas para produção em massa[66].	30
Figura 2.11 – Utilização de anel ligado ao terminal positivo para estabilizar o campo eléctrico[67].....	30
Figura 2.12 – Pormenor da colocação de vários anéis para controlar o campo eléctrico[67].....	31
Figura 2.13 – Obtenção de uma nanofibra por Drawing[68].	32
Figura 2.14 – Imagens SEM de nanofibras produzidas por Drawing (a) plano com ângulo recto; (b) plano curvilíneo[69].	33
Figura 2.15 – Molde para a produção de nanofibras utilizando Template Synthesis.[68].....	33
Figura 2.16 – Superfície da membrana de óxido de alumínio[70].....	33
Figura 2.17 – Esquema genérico do processo Phase Separation[68].	34
Figura 2.18 – Redes fibrosas obtidas por Phase Separation adaptado de[72].	34
Figura 2.19 – Ilustração do processo de crescimento e autoformação de nanofibras[73].	35
Figura 2.20 – Nanofibras obtidas por self-assembly (adaptado de[74]).	35
Figura 3.1 – Exemplos de motores passo-a-passo.	37
Figura 3.2 – Constituição do motor de íman permanente.	38
Figura 3.3 – Rotor do motor de íman permanente.	38
Figura 3.4 – Aspecto interior de um motor de relutância variável com três fases.	40
Figura 3.5 – Motores híbridos comerciais.	41
Figura 3.6 – Constituição do motor híbrido.....	41
Figura 3.7 – Vista em corte do motor híbrido.	42

Figura 3.8 – Funcionamento do motor híbrido.	42
Figura 3.9 – Enrolamentos do motor com alimentação unipolar.	44
Figura 3.10 – Disposição dos enrolamentos de um motor com alimentação bipolar.	44
Figura 3.11 – Evolução do binário do motor em função carga mecânica.	46
Figura 3.12 – Sinal de PWM para 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de duty-cycle ($T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5$).	47
Figura 3.13 – Constituição de um motor de CC sem escovas.	48
Figura 3.14 – Aspecto do estator de um motor industrial de CC sem escovas.	48
Figura 3.15 – Circuito de comando típico de um motor Brushless com três fases.	49
Figura 3.16 – Arduino IDE.	51
Figura 3.17 – Placa Arduino Mega 2560.	52
Figura 3.18 – Sensor óptico utilizado neste trabalho.	54
Figura 4.1 – Arquitectura de modelo proposto para implementação.	56
Figura 4.2 – Bomba de infusão KD Scientific (KD-100).	57
Figura 4.3 – Fonte de Alta Tensão Glassman EL30P1.5.	58
Figura 4.4 – Imagem do tipo de guias lineares utilizadas para montagem do protótipo (Drylin W – Igus).	58
Figura 4.5 – Disposição das guias lineares dos eixos X e Y.	59
Figura 4.6 – Imagem da guia linear Drylin SLW – Igus utilizadas para o eixo vertical da montagem.	59
Figura 4.7 – Modelo da disposição dos materiais utilizados para formar o sistema de posicionamento de três eixos ortonormados.	59
Figura 4.8 – Motor passo-a-passo da marca RS utilizado no protótipo.	60
Figura 4.9 – (a) Controladora de motores de passo; (b) Esquema de portos disponíveis na controladora.	60
Figura 4.10 – Esquema de ligações entre o motor de passo e a controladora.	61
Figura 4.11 – Circuito do relé para alimentação dos motores de passo.	61
Figura 4.12 – Motor BLDC 58 da marca Mclennan.	62
Figura 4.13 – Terminais de ligação e alimentação do motor BLDC 58.	62
Figura 4.14 – Filtro RC para atenuar o ruído à saída do sinal PWM ($R_1 = 1k\Omega$; $C_1 = 200\mu F$).	62
Figura 4.15 – Pormenor do motor BLDC com a sua possibilidade de rotação manual de 90 graus.	63
Figura 4.16 – Circuito do sensor óptico ($R_1 = 320\ \Omega$; $R_2 = 3,2\ k\Omega$).	63
Figura 4.17 – Circuito de debounce de cada sensor óptico.	64
Figura 4.18 – Imagem de uma das fontes de alimentação utilizadas na montagem.	65

Figura 4.19 – Esquema realista da disposição dos diversos componentes do sistema na bancada de laboratório.....	65
Figura 4.20 – Graus de liberdade de movimento do protótipo desenvolvido.	66
Figura 4.21 – Componentes instalados na bancada do laboratório.	66
Figura 4.22 – Componentes instalados na bancada do laboratório.	66
Figura 4.23 – Pormenor da instalação dos motores e das correias que fazem movimentar os eixos.....	67
Figura 4.24 – Pormenor da instalação do motor de rotação no eixo vertical (a); Pormenor da instalação do sensor óptico(b).....	67
Figura 4.25 – Diagrama da placa de circuitos.	68
Figura 4.26 – Correspondência entre os pinos do microcontrolador Arduino e os buses de ligação do circuito integrado.	70
Figura 4.27 – Circuitos desenvolvidos com integração do microcontrolador Arduino.....	70
Figura 4.28 – Diagrama geral de funcionamento do microcontrolador Arduino.....	71
Figura 4.29 – Diagrama de funcionamento da função de RESET.....	72
Figura 4.30 – Diagrama de funcionamento da função de calibração do microcontrolador.....	73
Figura 4.31 – Diagrama de funcionamento da leitura de mensagens realizado pela porta série do microcontrolador.....	74
Figura 4.32 – Diagrama de funcionamento da função de descodificação de mensagens obtidas pela porta série.....	75
Figura 4.33 – Interface inicial da aplicação desenvolvida em C#.....	76
Figura 4.34 – Interface de controlo manual dos motores da montagem.	76
Figura 4.35 – Interface de controlo do posicionamento global do alvo e caixa de controlo das posições globais guardadas.....	77
Figura 4.36 – Interface de controlo e execução de planos de acções.....	78
Figura 4.37 – Exemplo de plano de execução.	79
Figura 5.1 – Fotografia de uma membrana não-tecida obtida por electrofiação a partir de uma solução polimérica 60PU/40PBDO.....	82
Figura 5.2 – Microfotografia de microfibras obtidas por electrofiação a partir de uma solução 60PU/40PBDO (% w/w) em tolueno, após exposição à radiação UV e extracção sol-gel em tolueno. (a) estrutura helicoidal presente e que se forma quando a fibra está presa nas duas extremidades e a tensão a que esteve sujeita é libertada; (b) pormenor da rugosidade presente numa fibra elastomérica “Janus”.	82
Figura 5.3 – Biobateria.....	83
Figura 5.4 – Imagem de SEM das nanofibras de acetato de celulose revestidas com um metal...83	

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Diferentes polímeros usados para electrofiação e suas aplicações (adaptado de [37]).....	19
Tabela 2.2 – Polímeros e os solventes mais utilizados (adaptado de [46]).....	20
Tabela 2.3 – Tipo de colectores para alinhamento de fibras[66].....	28
Tabela 2.4 – Tipo de montagens para colectar novelos de fios[66].....	29
Tabela 2.5 – Questões comparativas de várias técnicas de produção de nanofibras[68].....	31
Tabela 2.6 – Vantagens e desvantagens das várias técnicas de produção de nanofibras[68].....	32
Tabela 3.1 – Sequência de alimentação dos enrolamentos do motor de íman permanente.....	39
Tabela 3.2 – Sequência de alimentação dos enrolamentos do motor de relutância variável.....	40
Tabela 3.3 – Sequência de alimentação dos enrolamentos do motor híbrido.....	42
Tabela 3.4 – Características principais do Arduino Mega 2560.....	52
Tabela 4.1 – Tabela de verdade da porta lógica NAND.....	64
Tabela 4.2 – Tabela de ligações dos dispositivos físicos com os portos do microcontrolador.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

°	– Grau
°C	– Graus Celsius
μm	– micrómetro
μl	– microlitro
A	– Ampere
BLDC	– <i>Brushless Direct Current</i>
bps	– bits por segundo
CC	– Corrente contínua
cm	– centímetro
CPU	– Unidade de controlo e processamento
EMI	– Interferência electromagnética
f	– funcionalidade
IDE	– Ambiente de desenvolvimento integrado (<i>Integrated Development Environment</i>)
I/O	– Input/Output – Entrada/Saída
kV	– quilovolt
LCD	– Display de Cristal Líquido (<i>Liquid Crystal Display</i>)
LED	– Díodo Emissor de Luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
mA	– miliampere
ml	– mililitro
mm	– milímetro
nm	– nanómetro
PBDO	– polibutadienodiol
PCB	– Placa de circuito Impressa
PEO	– poli óxido etileno
PU	– poliuretano
PWM	– Modulação por largura de pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
Rpm	– rotações por minuto
s	– segundo
SEM	– Microscopia electrónica de varrimento (<i>Scanning Electron Microscope</i>)
UV	– ultravioleta
USB	– Universal Serial Bus
V	– Volt

Capítulo 1. Introdução

“A Nanociência é, actualmente, a fronteira mais significativa do conhecimento a ser activamente perseguida. Dentro das aplicações previstas em nanotecnologia repousa a promessa da próxima revolução industrial”[3].

Na actualidade, a nanotecnologia é uma das áreas da Ciência que mais interesse desperta no Homem. O desafio deste ramo incide na capacidade de criar estruturas e novos materiais, descobrindo e aplicando novas técnicas e ferramentas para o posicionamento ordenado de átomos e moléculas. A Nanotecnologia encontra-se associada a diversas áreas de pesquisa e produção industrial, nomeadamente a electrónica, física, química, medicina, biologia e engenharia dos materiais, nas escalas micro e nanométricas e existe um especial interesse da comunidade científica, revelado desde a década de 1990, sobre os processos de sintetização de materiais em nano escalas devido às diversas aplicações nesta área[4].

Existem diversas técnicas de produção de fibras cujos diâmetros podem variar desde as escalas milimétrica à nanométrica, dependendo do método utilizado. As mais diversas aplicações (e.g. indústria têxtil, cablagem, medicina) utilizam fibras produzidas nas escalas milimétrica e micrométrica logo, a passagem para a produção de fibras na escala nanométrica é uma mais-valia para as actividades referidas e traz valor acrescentado[5].

A electrofiação é um método versátil de produção de estruturas fibrosas na escala micrométrica e nanométrica cujas características permitem produzir longas fibras de polímeros com diâmetros muito reduzidos e que, devido à sua elevada relação superfície/volume e o seu notável desempenho mecânico permite obter fibras que demonstram grande potencial para aplicações tais como a regeneração de tecidos[6], o fabrico de sensores[7], o vestuário[8] e a filtração[9].

A industrialização da electrofiação carece da superação de algumas limitações nomeadamente a baixa taxa de deposição de fibras, a produção de fibras com diâmetros controlados e a produção isenta de defeitos inerentes ao controlo desajustado dos parâmetros do processo. A investigação da electrofiação é de extrema importância por forma a identificar correctamente os problemas e determinar a melhor direcção na busca de soluções.

Com todas as vantagens e desvantagens inerentes ao processo de electrofiação surge a necessidade de desenvolver maquinaria que permita superar as limitações evidenciadas. Assim, esta dissertação pretende possibilitar o fabrico de micro e nano fibras implementando um sistema de electrofiação que permita controlar os diversos parâmetros do processo.

Neste contexto, emerge a necessidade do planeamento, montagem e automatização de uma estrutura suficientemente completa (em termos de funcionalidades) e robusta (fisicamente e em termos de fiabilidade da aplicação de controlo por computador). Para isso, pretende-se que façam parte do sistema:

- Um dispositivo de bombagem ou injeção da solução polimérica por meio de uma ou mais seringas;
- Uma fonte de alta tensão em corrente contínua (0 – 30 kV);
- Um colector passível de ser configurado de acordo com a orientação e a aplicação pretendida para as nanofibras;
- Uma mesa com sistema de eixos cartesiano (x, y, z) que permita a escolha do posicionamento do alvo onde as fibras são depositadas em relação à agulha da seringa;
- Um interface gráfico para interacção do sistema com o utilizador a executar num computador.

Perspectiva-se que todos os dispositivos sejam organizados numa bancada de preparação, isolado do contacto humano durante o funcionamento do processo.

1.1 Motivação

Baseado no número de publicações científicas nesta área e tomando como base o número crescente de montagens associadas à técnica de electrofiação, verifica-se um aumento progressivo e cada vez mais entusiasmante da sua aplicabilidade. Motivado pela escalada de aplicações a partir do processamento de polímeros, o grupo de investigação revê neste projecto oportunidades de interesse para aquisição/renovação de conhecimentos inerentes ao processo. A propósito disso, a possibilidade de adquirir conhecimento sobre a morfologia das fibras a partir das condições apropriadas de processamento (controlo individual dos parâmetros) é considerado um requisito que a montagem deverá proporcionar, tendo em vista a multiplicidade

das aplicações. Por conseguinte, esta é a principal motivação do projecto visando o desenvolvimento de um sistema para electrofiação.

Adicionalmente, evidenciado pela sua interdisciplinaridade, o processo requer a reunião de diferentes áreas académicas para o seu bom funcionamento, nomeadamente nas teorias relativas ao campo eléctrico, à mecânica dos fluidos, à electrodinâmica e à química dos polímeros. Dada a variedade de disciplinas intervenientes, admite-se dificuldades em estabelecer um modelo do sistema, mais concretamente, o modelo matemático do jacto fibroso. Por esse motivo, a forma de contribuir para a evolução relativa à caracterização mais detalhada e universal do processo é facultando a ligação das diferentes áreas de estudo.

Esta técnica surge também como forte candidata à revolução da indústria têxtil que, até agora, emprega preferencialmente processos de alongação mecânica de materiais fundidos a determinadas temperaturas para a produção de fios ou fibras. As técnicas de formação de fibras convencionais não são capazes de produzir fibras de diâmetros menores que dois micrómetros. Por exemplo, tipicamente, uma fibra comercial de poliéster tem um diâmetro de, aproximadamente, dez micrómetros[10]. Para muitas aplicações, incluindo aplicações têxteis, as fibras com diâmetros entre dez e cinquenta micrómetros são suficientes e apropriadas para a devida finalidade. No entanto, estas técnicas, bem desenvolvidas na indústria têxtil, possuem limitações relacionadas principalmente com a instabilidade hidrodinâmica e as propriedades mecânicas[11]. Nos casos onde as características estruturais e morfológicas são de importância decisiva, a electrofiação torna possível a produção de fibras com diâmetros que podem ir até aos cem nanómetros.

A actual utilização das nanofibras principalmente em aplicações biomédicas, ou para o desenvolvimento de nano dispositivos electrónicos, constitui uma outra motivação e um teste à capacidade de resposta do sistema. Nas aplicações biomédicas (diagnóstico, libertação controlada de medicamentos no organismo, próteses, etc.) as estruturas desenvolvidas revelam características interessantes, nomeadamente a flexibilidade, a degradação controlada e aspectos morfológicos da superfície fibrosa[12]. Também na fabricação de sensores, o objectivo é obter uma maior superfície de contacto num menor volume. Em sensores baseados em filmes finos, essa relação denota-se importante devido à quantidade de material a depositar. Por esse motivo, o processo de electrofiação é também inovador pela capacidade de criar nanofibras com uma razão área/volume consideravelmente elevada.

Em síntese, o facto de o projecto estar envolto num ambiente académico, não retira o objectivo de expandir as funcionalidades a ambientes de produção em larga escala, dada a oportunidade de desenvolver estruturas funcionais e diferenciadas pelos diâmetros micro e nanométricos das fibras.

1.2 Objectivos

O presente projecto apresenta como objectivo sumário, o desenvolvimento de um sistema para electrofiação orientado para a produção de micro e nanofibras. Para o cumprimento deste propósito, são exigidas etapas essenciais como a planificação, a implementação, e o controlo de todos os elementos que constituem o sistema.

Os objectivos inerentes à etapa de planificação referem-se à aquisição dos dispositivos necessários à montagem do equipamento para produção de fibras através de electrofiação, o estudo da disposição ideal dos dispositivos na bancada, a realização da planta da bancada, a definição das variáveis dos parâmetros a ajustar continuamente durante o processo, a definição das variáveis a monitorizar, a escolha da ferramenta para desenvolver o interface gráfico e, por último, o estudo dos métodos de controlo adequados.

Na etapa de implementação, objectiva-se a construção de uma mesa de eixos (x, y, z), o controlo dos motores de passo e do motor de corrente contínua e o circuito de leitura dos sensores. Por último, pretende-se a construção da bancada de processamento onde, posteriormente, serão incluídos os dispositivos (sistema de eixos, bomba de injeção, fonte de alimentação de alta tensão em corrente contínua (CC), os circuitos de accionamento/controlo e as duas fontes de alimentação para os circuitos de accionamento/controlo.

Para a automatização de todo este sistema pretende-se que seja dada a possibilidade ao utilizador de controlar os seguintes parâmetros: o fluxo de saída da solução polimérica, a diferença de potencial aplicada pela fonte de tensão em CC, o sentido e a velocidade de rotação do colector, a distância e posição do colector relativamente à agulha e a monitorização das grandezas mencionadas no ambiente de projecção das nanofibras. Estas são as funcionalidades mais relevantes que o utilizador/investigador deverá dispor.

Em consequência do que foi referido, o utilizador deve ter à sua disposição um terminal de controlo/monitorização, desenvolvido em C# (a executar num computador) e que lhe confira legitimidade de estabelecer contacto com as funcionalidades do sistema.

1.3 Enquadramento

O actual projecto integra-se na Tese de Dissertação para obtenção do grau de Mestre no curso de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores ministrado pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Esta proposta de dissertação incide na montagem, automatização e controlo de um sistema para electrofiação aproveitando equipamento existente e vocacionado para a produção de micro e nanofibras de

polímeros com posterior utilização em aplicações biomédicas, industriais, energéticas, electrónicas, têxteis, entre outras.

O centro de concepção deste projecto teve o seu espaço no Departamento de Engenharia Electrotécnica e no Departamento de Ciências dos Materiais da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

1.4 Organização

A dissertação de mestrado está organizada em cinco capítulos: introdução, electrofiação, fundamentos teóricos, projecto e implementação do sistema para electrofiação, conclusões e sugestões de trabalho futuro.

No capítulo introdutório é feita a identificação do problema e a proposta para a automatização do sistema de electrofiação, o enquadramento enquanto projecto integrado no âmbito do grupo de investigação do DCM, as motivações direccionadas ao aprofundamento do estudo do processo e às aplicações das nano fibras e, por último, a descrição dos objectivos do trabalho.

No segundo capítulo é efectuada uma análise à evolução da técnica de electrofiação, realçando o princípio de funcionamento da montagem básica, alguns tipos de montagens e uma pequena descrição do estado da arte no que toca às áreas de aplicação das nanofibras. De seguida, são apresentados e descritos os diversos parâmetros da solução, processamento e ambiente como factores influentes nas morfologias resultantes das nano fibras.

No capítulo três são apresentados os fundamentos teóricos relativos aos dispositivos físicos utilizados para desenvolver o protótipo.

No capítulo seguinte, capítulo quatro, descreve-se a implementação prática realizada até ao momento, relativo ao processamento da técnica, baseada no controlo orientado por computador. As considerações de ordem prática sobre a estrutura, particularmente o accionamento dos dispositivos, são exploradas neste capítulo. No capítulo cinco são apresentados alguns ensaios e resultados práticos já obtidos com o equipamento desenvolvido.

Finalmente, no sexto e último capítulo são referidas as conclusões mais relevantes desta tese e apresenta-se um conjunto de propostas de trabalho a implementar futuramente, com o objectivo de promover a caracterização ainda mais completa das nano fibras.

Capítulo 2. Electrofiação

A revisão de literatura apresentada neste capítulo baseia-se na investigação disponível reportada essencialmente a artigos e revistas de investigação. A revisão aborda, em primeiro lugar, a técnica e montagem convencionais e algumas variantes do método de produção de micro e nanofibras em estudo. Depois, apresenta-se uma breve evolução histórica do processo até à actualidade. Por último, abordam-se as áreas de aplicação adequadas ao processo e alguns métodos alternativos para a produção de fibras à micro e nanoescala utilizados na actualidade.

2.1 Princípios básicos

Electrofiação designa uma técnica de processamento que permite obter micro e nano fibras, com diâmetros que variam desde os dois nanómetros até vários micrómetros[13], [14], a partir de soluções poliméricas. Através desta técnica é possível a produção de fibras contínuas que são, depois, recolhidas num alvo apropriado. O facto de ser possível produzir fibras cujos diâmetros estão na ordem de grandeza dos micrómetros, ou mesmo nanómetros, de forma relativamente simples e pouco dispendiosa contribui para o grande interesse que existe actualmente pela técnica de electrofiação.

A *electrofiação* é um processo de produção muito versátil que permite obter micro e nano fibras a partir de uma gama diversificada de soluções poliméricas[4]. As fibras obtidas através desta técnica apresentam como vantagem o facto de possuírem uma elevada área superficial aliada a um baixo custo de produção e simplicidade da montagem, tornando-as ideais para um vasto leque de aplicações.

A designação electrofiação deriva do facto de esta técnica se basear na utilização de um campo eléctrico para a produção de fibras. O princípio de funcionamento da deposição de fibras por electrofiação baseia-se na repulsão electrostática de cargas eléctricas[2].

A configuração típica de um sistema de deposição por electrofiação compreende uma seringa, onde é colocada a solução polimérica a partir da qual se pretende produzir as fibras, uma bomba difusora, que controla o caudal da solução através da agulha da seringa, um alvo, onde se irão recolher as fibras depositadas e que é mantido a potencial eléctrico zero, e uma fonte de tensão, para aplicar uma diferença de potencial entre a ponta da agulha e o alvo. De modo a poder ser ligado à terra, potencial zero, o alvo deve ser metálico para que seja condutor de corrente eléctrica.

Durante o processo de deposição, a bomba infusora é regulada de modo a que o caudal da solução seja o necessário para que exista sempre uma gota de solução na ponta da agulha. Esta gota assume uma forma esférica que é a forma que permite minimizar a sua tensão superficial. Quando sujeita à acção do campo eléctrico estabelecido entre a ponta da agulha e o alvo, é induzida na superfície da gota a formação de cargas eléctricas que aumentam à medida que a intensidade do campo eléctrico aumenta. A gota fica assim sujeita a duas forças electrostáticas, uma força de repulsão devido às cargas superficiais e uma outra força exercida pelo campo eléctrico aplicado. A partir de uma determinada intensidade do campo eléctrico aplicado as cargas superficiais são suficientes para tornar a gota esférica instável[15] e esta sofre uma distorção passando a apresentar uma forma cónica, vulgarmente conhecida como cone de Taylor (Figura 2.1).

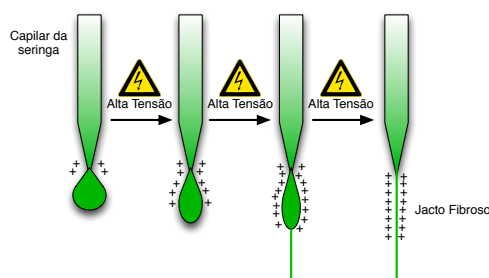


Figura 2.1 – Representação esquemática do cone de Taylor. Devido à aplicação do campo eléctrico, existe uma acumulação de cargas na superfície da gota. Evolução da gota de solução ao superar a tensão superficial inerente e formação do jacto fibroso[4].

Quando o campo eléctrico atinge um valor crítico, as forças de repulsão electrostáticas tornam-se mais fortes do que a tensão superficial da solução polimérica. Eventualmente, um jacto de solução carregado electricamente liberta-se da gota e dirige-se para o alvo.

Durante o percurso até ao alvo, o jacto polimérico é sujeito a uma taxa de corte elevada e é estirado formando uma fibra contínua com um diâmetro final várias vezes mais pequeno do que o diâmetro interno da agulha[16]. Inicialmente, o percurso do jacto é rectilíneo mas antes de chegar ao alvo, e devido a instabilidades provocadas pela interacção electrostática entre o

campo aplicado e as cargas na superfície do jacto, a trajectória torna-se aleatória. O serpentear do jacto no ar torna o processo de deposição de fibras mais instável e dificulta a deposição em zonas específicas do alvo.

Uma vez que, tal como já foi referido, o jacto está carregado electricamente e o alvo é mantido a potencial zero, a fibra formada pelo estiramento do jacto vai-se dirigir para o alvo onde fica depositada. Como a electrofição é um processo em contínuo, e as fibras produzidas se depositam em cima das fibras que já se encontram no alvo, a espessura das membranas obtidas depende do tempo de deposição. Durante o percurso entre a ponta da agulha e o alvo uma quantidade suficientemente elevada de solvente evapora-se. Isto garante que, ao entrar em contacto com o alvo, as fibras possuem rigidez suficiente para suportar o seu próprio peso (e, assim, manter a forma) e que não se fundam com as fibras depositadas vizinhas. Uma das características do processo de produção de fibras por electrofição é o facto de as fibras obtidas apresentarem diâmetros distribuídos ao longo de uma gama de valores e não possuírem um diâmetro único.

Uma das vantagens da técnica de electrofição reside na simplicidade da montagem necessária e, conseqüentemente, num custo relativamente baixo para a sua implementação. O esquema típico de uma montagem de electrofição está representado na Figura 2.2.

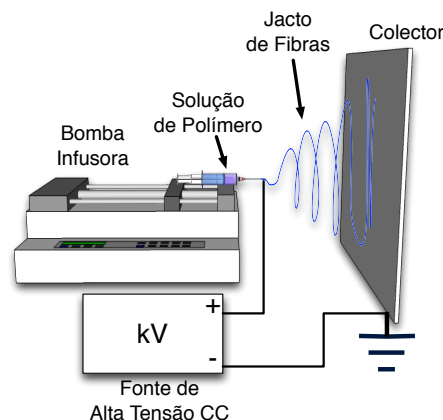


Figura 2.2 – Diagrama esquemático da montagem básica de electrofição[2].

2.2 Revisão histórica

Nas últimas décadas tem-se verificado um crescente interesse na utilização de fibras produzidas por electrofição. No entanto, o comportamento das gotas e jactos electricamente carregados começou a ser estudado e investigado há alguns séculos. A técnica de electrofição tem a sua origem noutra técnica que também utiliza a aplicação de diferenças de potencial

elevadas denominada electrospraying que consiste na dispersão de um jacto líquido em forma de micro gotículas.

Em 1875, Bose descreve aerossóis gerados pela aplicação de potenciais eléctricos elevados a gotas de fluidos. Em 1882, Lord Rayleigh investigou o número de cargas necessárias para ultrapassar a tensão superficial de uma gota[4]. Mais tarde, Cooley e Morton apresentaram patentes nos Estados Unidos da América, em 1902, que definiam dispositivos que produziam fibras através da aplicação de cargas eléctricas[17].

Em 1914, John Zeleny[18] apresentou um novo desenvolvimento significativo, publicando um trabalho sobre o comportamento dos líquidos nas extremidades dos capilares metálicos. Zeleny iniciou os estudos para modelar matematicamente o comportamento dos fluidos sob a acção de forças electroestáticas.

Entre 1934 e 1944, Anton Formhals revolucionou a produção contínua de fibras que utilizava, não a acção mecânica, mas um campo eléctrico[19]. Formhals publicou uma série de patentes, descrevendo montagens experimentais para produzir filamentos de polímeros utilizando uma força electrostática. A primeira patente sobre electrofiação servia para produzir fios para aplicação têxtil e era usada uma tensão de 57kV. Era usada uma solução de acetato de celulose dissolvido em acetona que era, posteriormente, depositada num tambor giratório. Contudo, Formhals constatou que havia a necessidade de estabelecer uma distância entre o alvo e a saída da solução. Esta necessidade foi justificada pela existência de um tempo mínimo de evaporação do solvente, antes do contacto com a zona de projecção. Formhals garantiu as patentes americanas 2116942, 2160962 e 2187306 em 1938, 1939 e 1940 [20-22].

Entre 1964 e 1969, Geoffrey Taylor estudou a técnica de electrofiação, concebendo o modelo matemático relativo ao comportamento da gota de solução polimérica quando sujeita à acção de um campo eléctrico. A gota sofreria uma deformação, distorcendo-se numa geometria cónica devido ao campo aplicado. A importância deste trabalho é revelada por ter sido atribuído o nome Cone de Taylor a este fenómeno[23], [24].

No período compreendido entre os desenvolvimentos de Taylor e a década de 90 houve um decaimento no interesse de investigação em electrofiação. No entanto, existem alguns trabalhos nesta área. Em 1971 Baumgarten deu início às investigações que relacionam os parâmetros de processamento e as propriedades estruturais das fibras. Baumgarten obteve fibras de acrílico com diâmetros compreendidos entre 500nm e 1100nm[25]. A análise realizada investigou a correlação entre o diâmetro das fibras, o comprimento do jacto, a viscosidade da solução, o fluxo e o gás do meio. Neste trabalho, Baumgarten relacionou a viscosidade da solução com o diâmetro das fibras obtidas. Para além disso, verificou que o diâmetro do jacto começa por diminuir com o aumento do campo eléctrico aplicado para depois aumentar com o aumento do campo.

Aproximadamente uma década depois das publicações de Baumgarten, surgiram novos métodos de manipular as propriedades estruturais das fibras. Larrondo e Mandley conseguiram produzir fibras através da fusão de polietileno e polipropileno[26]. Estes autores verificaram que as fibras possuíam diâmetros maiores que as fibras produzidas a partir de uma solução com solvente, assim como verificaram que o diâmetro das fibras e a temperatura de fusão estão relacionados.

Hayati também estudou a influência dos parâmetros experimentais nas fibras produzidas, mais especificamente na estabilidade do jacto de fibras. Conclui que elevada condutividade da solução associada a campos eléctricos de grande intensidade dá origem a jactos instáveis com movimentos aleatórios em diversas direcções. As fibras produzidas com estas características tinham uma gama de diâmetros mais alargada. Hayati verificou ainda que para uma dada condutividade e tensão, a estabilidade é aumentada com o aumento do fluxo da solução, mas à custa da produção de gotas de maiores dimensões[27].

2.3 História Recente

Na década de 1990, o processo de electrofiação foi redescoberto por Doshi e Reneker [28] como fonte potencial para a produção de material nano-estruturado, dado o seu interesse no campo da Nanotecnologia. Os autores estudaram as propriedades de nano fibras de poli óxido etileno (PEO) em função da concentração da solução e do campo eléctrico aplicado e modelaram matematicamente o processo cujas cargas eléctricas são movimentadas pelas acção do campo eléctrico e transferem movimento ao fluido. Verificaram também que o diâmetro dos jactos diminui com o aumento da distância. Os autores formularam, ainda, a hipótese de ocorrência de separação de um jacto de fibra causada pelo aumento da repulsão das cargas durante a elongação das fibras. No entanto, estudos recentes utilizaram câmaras de alta velocidade para captar o fenómeno concluindo que existe uma instabilidade no jacto da fibra que leva a fibra a dobrar e rodopiar rapidamente, resultando na incorrecta noção de ramificação da fibra[29].

A partir da década de 1990, concretamente após o impulso de Doshi e Reneker, o número de publicações descrevendo as diversas condições de funcionamento da electrofiação assim como novas aplicações aumentou significativamente, como se pode observar na Figura 2.3.

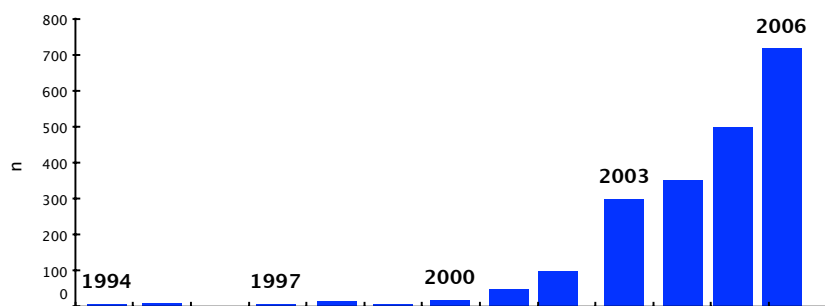


Figura 2.3 – Número (n) de publicações científicas e patentes por ano (1994-2006) com a palavra-chave "electrospinning" (fonte: SciFinder Scholar adaptado de [4]).

A gama de possibilidades apresentada pelo processo de electrofiação engloba uma multiplicidade de conceitos novos e interessantes que estão a ser desenvolvidos a uma velocidade vertiginosa. Este rápido desenvolvimento é reflectido pelo enorme número de publicações científicas e patentes actualmente disponíveis.

Uma das razões principais para o aumento de interesse neste assunto é a combinação de esforços, tanto de investigação como orientados para aplicações específicas, de diferentes áreas da ciência e da engenharia. Estes esforços, ao nível da investigação, geralmente, têm como alvo sistemas complexos e altamente funcionais, o que certamente pode ser aplicado a nível comercial. Sistemas de fibras em que as propriedades macroscópicas (isto é, combinações físicas e biológicas das propriedades) podem ser orientadas por meio de modificações no nível molecular são de particular interesse. Diversos modelos têm sido desenvolvidos constantemente, com o objectivo de aumentar o controlo sobre o processo. A título de comparação com as primeiras montagens propostas por Formhals, a Figura 2.4 apresenta um dos vários modelos desenvolvidos para a produção de micro e nano fibras por electrofiação.

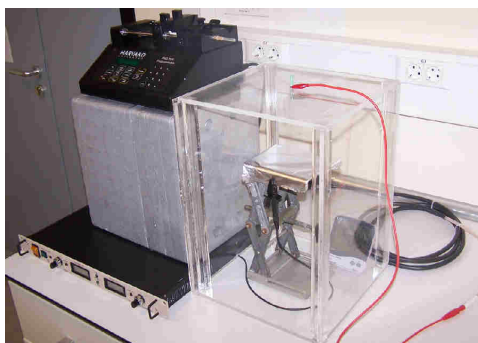


Figura 2.4 – Montagem básica para o processamento em laboratório[30].

A popularidade do processo de electrofiação pode ser observada pelo facto que mais de 200 universidades e institutos de pesquisa em todo o mundo estarem a estudar os vários aspectos da técnica assim como as fibras produzidas. Diversas empresas, como por exemplo *eSpin Technologies*, *NanoTechnics* e *KATO Tech* estão activamente envolvidas em colher os benefícios das vantagens únicas oferecidas pela electrofiação, enquanto empresas como a *Donaldson Company* e a *Freudenberg* já utilizam o processo nas últimas duas décadas nos seus

produtos de filtragem do ar. Associadas ao fenómeno, também a *Biotech*, *Healthcare* e indústrias fabris, deixam prever um aumento significativo na exploração desta técnica.

2.3.1 Equipamentos disponíveis na actualidade

Actualmente, existem várias empresas que disponibilizam equipamentos de produção de micro e nano fibras utilizando a técnica de electrofição. Os equipamentos disponíveis dividem-se, habitualmente, em equipamentos para funções laboratoriais/investigação e equipamentos industriais para produção de fibras em larga escala.

A *Nabond* apresenta uma unidade de produção de fibras utilizando electrofição para fins laboratoriais (que pode ser observada na Figura 2.5) que possui diversas características técnicas.



Figura 2.5 – Equipamento para produção de nano fibras disponível na Nabond[31].

Dessas características destacam-se:

- Fonte de alta tensão variável 0~50kV, com display digital e protecção de picos de tensão e corrente.
- Duas bombas infusoras que podem ser controladas independentemente com display digital. O caudal, volume e tempo de infusão podem ser controlados.
- Diferentes agulhas podem ser adaptadas.
- Colectores adaptáveis com tamanhos variados com rotação e velocidades de 150 a 6000rpm.
- Permite aquecer a seringa.
- Actuador linear no eixo Z para mover agulha em relação ao colector (máximo 150mm, velocidade 1~15mm/s).

A empresa *Fuence* (Figura 2.6) também produz equipamentos laboratoriais para a produção de micro e nano fibras utilizando electrofiação (também permite a utilização da técnica electrospraying).



Figura 2.6 – Um dos equipamentos disponíveis para aquisição na empresa Fuence.

Existem mais empresas que fornecem equipamentos para produção em escala laboratorial das quais se destaca a empresa *Electrospinz* cujo modelo ES1a pode ser observado na Figura 2.7.



Figura 2.7 – Equipamento ES1a disponível na Electrospinz.

2.4 Aplicações

A simplicidade de processamento das nanofibras, associada à versatilidade na conjugação da montagem experimental, resulta em estruturas multi-funcionais e fazem do processo de electrofiação uma técnica poderosa na produção de fibras ultra finas a partir de diferentes materiais. O interesse neste processo em aplicações reais é devido essencialmente a três aspectos do processo. Primeiro, o tamanho das fibras produzidas encontra-se nas escalas micrométrica e nanométrica, assim como a sua superfície, o que leva a diferentes formas de interacção com outros materiais, quando comparadas com materiais com propriedades apenas macroscópicas. Em segundo lugar, devido às nanofibras serem produzidas com um baixo

número de defeitos é possível alcançar os valores calculados teoricamente. Por último, as fibras que são produzidas possuem uma proporção inerente de elevada área de superfície para muito pouco volume. A combinação destes três aspectos abre as portas para aplicações desta tecnologia nas mais diferentes áreas como a filtração, substitutos catalíticos, compósitos fortíssimos, reactores biológicos, têxteis funcionais, encapsulamento de fármacos, protecções ao nível de traumatismos cutâneos e produção de material médico (Figura 2.8).

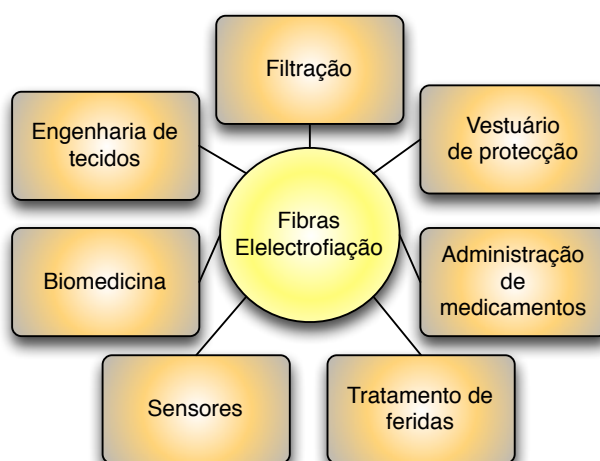


Figura 2.8 – Aplicações da Electrofição em diferentes sectores.

2.4.1 Aplicações Biomédicas

Na biologia considera-se que quase todos os tecidos e órgãos humanos são organizados em formas ou estruturas de nanofibras. Os mais diversos exemplos podem ser dados nomeadamente os ossos, o colagénio, as cartilagens ou a pele. A oportunidade das nanofibras servirem a medicina nos seus diferentes ramos deve-se sobretudo às suas capacidades de adaptação aos parâmetros clínicos. Os investigadores têm o maior interesse e motivação para encontrar aplicações baseadas em nanofibras.

As nanofibras geradas a partir da electrofição têm sido propostas para reconstituição de tecidos que possam ser aplicadas em vasos sanguíneos[32], cartilagens, ossos e coração[33]. As nanofibras podem ser depositadas como uma camada fina sobre o dispositivo protésico no corpo humano, através de um polímero bio compatível. Com este método espera-se reduzir incompatibilidades biológicas de forma a evitar a rejeição dos tecidos após implantação.

Os tecidos gerados por electrofição podem também ser usados para o tratamento de lesões traumáticas ou queimaduras de pele humana, através de pensos, compressas ou dispositivos hemostáticos. Os materiais produzidos, quando em contacto com a pele, revelam

propriedades fundamentais, impulsionando o tratamento da ferida pela incorporação de compostos terapêuticos[4].

Outra aplicação na área da biomedicina são os biossensores. Normalmente, este tipo de sensores são constituídos por uma membrana funcional e um transdutor e o seu desempenho é afectado por diversos factores, donde se destaca o tempo de resposta, o envelhecimento e a sensibilidade. Esta última é particularmente importante devido à necessidade de detecção de substâncias biológicas em muito baixa concentração. Para melhorar este factor é necessário o surgimento de filmes com maior área de superfície por unidade de volume, surgindo então uma oportunidade para a aplicação de electrofiação para produzir nanofibras[34], [35].

2.4.2 Indústria Farmacêutica e Cosmética

Um das preocupações mais importantes da indústria farmacêutica e medicina prende-se com a forma como os medicamentos são administrados nos pacientes. Actualmente, a administração de medicamentos/compostos farmacêuticos nos pacientes é normalmente feito por ingestão ou por via cutânea. Em geral, quanto menor as dimensões do medicamento e do material de revestimento necessário para o encapsular, melhor será o processo de absorção realizado pelo organismos. A libertação de substâncias através de nanofibras é baseada no princípio do aumento da taxa de dissolução das partículas com a área superficial do medicamento e seu portador. Devido às propriedades funcionais das nanofibras, as composições farmacêuticas podem ser concebidas para proporcionar a libertação ou dissolução de forma rápida ou mais lenta[29], [36].

Outras aplicações nesta área estão ligadas com aplicação de terapias cancerígenas e terapias de inalação[4].

Na área da cosmética, as nanofibras de polímeros podem ser adaptadas para o fabrico de máscaras para o tratamento da pele como cremes, loções ou pomadas. Esta adição pode ter vantagens a nível terapêutico ou médico[37].

2.4.3 Aplicações Têxteis

O vestuário e a indústria têxtil são áreas muito importantes para a aplicação de electrofiação. Investigações recentes indicam que, em relação aos têxteis convencionais, as nanofibras, devido à sua grande área de superfície e à sua elevada porosidade, apresentam capacidades para neutralizar agentes químicos, reduzir a resistência ao ar e aumentar a impermeabilidade à água. A electrofiação toma então um papel importante no desenvolvimento

destes novos tecidos tanto para aplicações industriais na área do vestuário (natação, por exemplo) mas também para aplicações para protecção militar. Estes aspectos são importantes para a eficácia no combate individual de soldados, permitindo maximizar a capacidade de sobrevivência em ambientes hostis e extremos[38], [38], [39].

Para além das aplicações mencionadas podem ser ainda referidas as investigações de nanofibras (vidro, fibra de carbono e outros compostos sintéticos) para reforçar outros produtos técnicos[4].

2.4.4 Aplicações Energéticas e Electrónicas

As nanofibras com características condutoras são vistas com potencial para o desenvolvimento de micro/nano dispositivos electrónicos nomeadamente sensores (térmicos, piezoeléctricos e ópticos) e actuadores.

Na área do armazenamento de energia, concretamente em baterias, está a ser investigada a utilização de nanofibras. Membranas condutoras à nano escala são também bastante adequadas para utilização como eléctrodos porosos no desenvolvimento de baterias de alto desempenho e células de combustível devido à sua elevada porosidade e inerente área de superfície total. Baterias de polímeros foram desenvolvidas para telemóveis para substituir as convencionais baterias de lítio volumosas. As nanofibras condutoras oferecem propriedades notáveis nas baterias de polímeros, por exemplo, menos fugas de electrólito, flexibilidade de elevada dimensão e alta densidade de energia por unidade de peso. No entanto, existe ainda uma necessidade de melhorar a densidade de energia por peso das baterias para aumentar a sua quota de mercado[4].

Para além das baterias, também a aplicação das nanofibras condutoras foi reportada na produção de supercondensadores. Kim et al. mencionaram que as nanofibras de Polybenzimidazol, após um processo de carbonização a altas temperaturas (850°C), exibiram longos tempos de carregamento e descarregamento[40].

2.4.5 Filtragem

A eficiência de um dispositivo de filtração está directamente relacionada com a composição da sua estrutura. Para um filtro alcançar altas eficiências é necessário que os tamanhos dos canais e dos poros no material do filtro seja ajustado para a dimensão das partículas a serem filtradas. Para filtrar partículas cada vez mais finas, é necessário uma transição no tamanho das fibras para uma escala micro e nano métrica.

As nanofibras já são usadas extensivamente em filtros de ar[41]. Filtros de ar convencionais consistem em esteiras do papel compostos por fibras com diâmetros na gama dos micrómetros. Estes filtros funcionam através de captação das partículas no interior do filtro, o que significa que todo o material do filtro está envolvido na retenção da partícula. Como o número de partículas retidas aumenta, a pressão dentro do filtro também aumenta e, acima de um certo limite, o filtro já não pode ser utilizado. Um hipótese para a melhoria das propriedades do filtro consiste em revestir o material bruto do filtro com uma camada de nanofibras, sendo as partículas retidas na superfície[42]. A pressão remanescente é significativamente reduzida e o tempo do filtro pode ser prolongada. Este tipo de filtro de superfície alcançou grande sucesso no mercado.

As nanofibras de polímeros podem ser electrostaticamente carregadas, de forma a modificar a capacidade de atracção das partículas. Perante esta característica, a eficiência de filtração melhora, sem aumentar a queda de pressão. Neste sentido, o processo de electrofição garante boa resposta na produção de fibras com propriedades electrostáticas[43-45].

2.5 Polímeros utilizados para electrofição

Existe uma vasta gama de polímeros que são utilizados para produzir micro e nanofibras através do processo de electrofição e que têm as mais diversas aplicações. Diversos estudos referem os mais variados polímeros para produção de nanofibras desde polímeros sintéticos, polímeros naturais ou uma mistura de ambos, incluindo proteínas, ácidos nucleicos e até mesmo polissacarídeos. Ao longo dos anos, mais de 200 polímeros têm sido fiados com sucesso através de electrofição a partir de polímeros naturais e caracterizados de acordo com as suas aplicações. Vários polímeros utilizados na electrofição são listados na Tabela 2.1 de acordo com as suas aplicações principais.

Polímeros	Aplicações
Ácido poliglicólico (PGA)	<i>Scaffolds</i> não-tecidos para engenharia de tecidos (TE)
Ácido láctico-co-ácido glicólico (PLGA)	Aplicações biomédicas, tratamento de feridas
Policaprolactona (PCL)	Engenharia para tecidos osteopáticos
Ácido poli(L-láctico) (PLLA)	Substratos de células 3D
Poliuretano (PU)	Modelos de membranas não-tecidas para tratamento de feridas
Co-polímero de etileno e álcool vinílico (PEVA)	<i>Scaffolds</i> não-tecidos para engenharia de tecidos
Poliestireno (PS)	Engenharia de tecidos da pele
1,2-polibutadieno sindiotático Syndiotactic 1,2-polybutadiene	Aplicações em engenharia de tecidos
Fibrinogénio	Tratamento de feridas
Álcool polivinílico/acetato de celulose (PVA/CA)	Biomateriais
Acetato de celulose	Membranas de absorção/feltros

Álcool polivinílico	Pensos para feridas
Fibras de seda, seda/PEO (óxido de polietileno)	<i>Scaffolds</i> não-tecidos para engenharia de tecidos
Seda	Aplicações Biomédicas
Fibras de seda	<i>Scaffolds</i> nanofibrosos para tratamento de feridas
Seda/quitosano	Pensos para feridas
Quitosano/PEO	<i>Scaffolds</i> TE, libertação controlada de fármacos, tratamento de feridas
Gelatina	<i>Scaffolds</i> para tratamento de feridas
Ácido Hialurónico, (HA)	Implantes médicos
Celulose	Membranas de afinidade
Gelatina/polianilina	Engenharia de tecidos para <i>scaffolds</i>
Colagénio/quitosano	Biomateriais

Tabela 2.1 – Diferentes polímeros usados para electrofiação e suas aplicações (adaptado de [37]).

2.5.1 Polímeros Naturais e Sintéticos

A electrofiação é basicamente o desenho de um fluido polimérico, logo existem os mais variados e diferentes tipos de polímeros e precursores que podem ser electrofiados para produzirem fibras. O material adequado irá depender da aplicação. Materiais como polímeros e compósitos de polímeros podem ser produzidos directamente por electrofiação. Outros materiais, como cerâmicos e nanotubos de carbono necessitam processamento posterior das fibras produzidas.

Actualmente, os mais variados polímeros são fiados por electrofiação e as nanofibras produzidas são utilizadas nas mais diversas aplicações tais como engenharia de tecidos, membranas de filtração e aplicações biomédicas. Normalmente, polímeros formados naturalmente exibem uma melhor biocompatibilidade em comparação com polímeros sintéticos, quando usados em aplicações biomédicas. Uma forte razão para a utilização de polímeros naturais para electrofiação é a sua capacidade inerente para ligar células, uma vez que possuem sequências de proteínas específicas (tais como arginina, glicina e ácido aspártico). Nos últimos anos, electrofiação de proteínas, principalmente colagénio, gelatina, elastina e seda têm sido relatadas. Os polímeros naturais mais utilizados são o colagénio, o quitosano, a gelatina, a caseína, o acetato de celulose, a proteína da seda, a quitina, o fibrinogénio, etc. Os “*scaffolds*” fabricados a partir de polímeros naturais prometem uma melhor funcionalidade clínica. No entanto, nos anos recentes têm sido relatados casos em que algumas das propriedades naturais dos polímeros são perdidas, o que exige preocupação. Zeugolis et al. demonstraram pela primeira vez que as propriedades de um biomaterial de colagénio perdem-se quando são formadas nanofibras por electrofiação em que os solventes são flúor-álcoois. O colagénio é um proeminente biopolímero e é usado extensivamente devido às suas excelentes propriedades

biológicas, físicas e químicas para aplicações na engenharia de tecidos. Na tabela 2.2 pode observar-se alguns polímeros e os solventes mais utilizados.

Material	Solvente
Poliimidas Ácido poliâmico Poli éter imida	Fenol m-cresol Cloreto de Metileno
Poliaramida Poligamabenzilglutamato	Ácido Sulfúrico Dimetilformamida
Politeraftalamida de p-fenileno Nylon 6- poliimda	Ácido Sulfúrico Ácido Fórmico
Poliacrilonitrilo Politeraftalato de etileno Nylon	Dimetilformamida Ácido trifluoracético Diclorometano
Polianilina	Ácido Sulfúrico
ADN Polihidroxitirato-valerato PLLA(Poli L-ácido láctico)	Água Clorofórmio Clorofórmio ou Cloreto de Metileno e Dimetilformamida
Poli (D,L-ácido láctico)	Dimetilformamida
PEO (óxido de polietileno)	Água
PMMA (polimetil-metacrilato)	Tolueno
PU (Poliuretano)	Dimetilformamida

Tabela 2.2 – Polímeros e os solventes mais utilizados (adaptado de [46]).

2.6 Efeito dos diversos parâmetros na electrofiação

O processo de electrofiação é influenciado por muitos parâmetros, classificados amplamente por parâmetros da solução, parâmetros do processo e parâmetros ambientais. Os parâmetros da solução incluem a viscosidade, a condutividade, o peso molecular e tensão de superfície. Os parâmetros do processo incluem o campo eléctrico aplicado, a distância entre a ponta da agulha e o colector e a taxa de fluxo. Cada um destes parâmetros afecta significativamente a morfologia das fibras obtidas e, por manipulação adequada destes parâmetros, pode obter-se nanofibras de morfologia e diâmetros desejados. Além destas variáveis, os parâmetros ambientais desempenham um papel significativo na determinação da morfologia e diâmetro das fibras produzidas e englobam a humidade, a temperatura e a pressão atmosférica.

2.6.1 Parâmetros da Solução

2.6.1.1 Concentração

No processo de electrofiação, para a formação de fibras ocorrer, uma concentração de solução mínima é necessária. Em diversas investigações verificou-se que com concentrações de solução baixas, uma mistura de grânulos e fibras é obtida e, à medida que aumenta a concentração da solução, a forma dos grânulos altera-se para dar forma a fibras uniformes[47]. Os diâmetros das fibras são maiores devido à maior resistência da viscosidade. Deve, portanto, existir uma concentração da solução óptima para o processo de electrofiação, pois com baixas concentrações são formados grânulos em vez de fibras, e com concentrações elevadas não é possível formar fibras contínuas devido à incapacidade de manter o fluxo da solução na ponta da agulha[48]. Os investigadores tentaram encontrar uma relação entre a concentração da solução e o diâmetro da fibra e encontraram uma relação na lei da potência, em que o aumento da concentração da solução aumenta o diâmetro da fibras[49].

2.6.1.2 Massa Molecular do Polímero

A massa molecular do polímero tem um efeito significativo sobre as propriedades reológicas e eléctricas, tais como a viscosidade, tensão superficial, condutividade e resistência dieléctrica[47]. A massa molecular é um parâmetro que influencia a morfologia das fibras produzidas por electrofiação e, geralmente, soluções de polímeros com elevada massa molecular têm sido usados pois proporcionam a viscosidade desejada para a geração de fibras. A massa molecular do polímero reflecte o número de entrelaçamentos das cadeias de polímeros numa solução, logo está interligada também com a viscosidade da solução. Tem sido observado que uma solução com massa molecular muito baixa tende a formar grânulos em vez de fibras e uma solução de elevada massa molecular origina fibras com maiores diâmetros médios. Esta relação foi investigada por Gupta et al.[50].

Tem também sido observado que as elevadas massas moleculares não são sempre essenciais para o processo de electrofiação caso existam suficientes interações intermoleculares que substituam a conectividades entre cadeias[51].

2.6.1.3 Viscosidade

A viscosidade das soluções poliméricas desempenha um papel importante na determinação do tamanho e morfologia das fibras durante a electrofiacção. Verificou-se que, numa solução com viscosidade muito baixa não há formação de fibras contínuas e que uma solução com viscosidade muito elevada há dificuldade em que o jacto da solução saia da agulha, por isso, surge a exigência de existir uma viscosidade óptima para electrofiacção[48], [52].

A viscosidade, a concentração e a massa molecular dos polímeros estão correlacionados entre si. A viscosidade tem sido fortemente relacionada com a concentração da solução e a relação entre viscosidade do polímero e/ou concentração e as fibras obtidas por electrofiacção em diversos sistemas foram estudados[53].

Geralmente, em soluções de polímeros de alta viscosidade, apresentam tempos de relaxação maiores o que pode impedir a fractura dos jactos fiados durante a electrofiacção. Um aumento da viscosidade da solução dá origem a um diâmetro da fibra maior e mais uniforme. Na electrofiacção, a viscosidade da solução desempenha um papel importante na determinação da gama de concentrações a partir da qual as fibras contínuas podem ser obtidas. Quando a solução tem baixa viscosidade são formados essencialmente grânulos ou fibras frisadas[28], sendo a tensão superficial um factor dominante. Os estudos referidos revelam que existem melhores valores de viscosidade para polímeros específicos, tendo esta propriedade uma influência notável sobre a morfologia das fibras.

2.6.1.4 Tensão Superficial

A tensão superficial refere-se à tensão aproximada na camada superficial de um fluido. Quando a solução se encontra num estado de equilíbrio, as moléculas no interior dessa solução são solicitadas igualmente em todas as direcções pelas forças de atracção das moléculas vizinhas. As moléculas da superfície do fluido sofrem apenas atracção lateral e inferior. Devido à interacção conjunta dessas forças, existe uma tensão na superfície que faz a mesma comportar-se como uma membrana elástica.

Na electrofiacção, quando um fluido é carregado electricamente, a sua superfície actua em oposição à tensão superficial, provocando a alteração da sua forma. O impacto da tensão superficial na morfologia e na dimensão das nanofibras surge como um parâmetro de interesse na caracterização do processo de electrofiacção.

Geralmente, a alta tensão superficial de uma solução inibe o processo de electrofiacção devido à instabilidade dos jacto e a geração de gotículas pulverizadas[54]. A formação de

gotículas, grânulos e fibras depende da tensão superficial da solução e uma tensão superficial menor permite que o processo de electrofição ocorra com um campo eléctrico menor[47]. No entanto, uma tensão superficial menor do solvente não será necessariamente melhor para produzir fibras por electrofição. Basicamente, a tensão superficial determina os limites inferior e superior para a produção de fibras caso todas as outras variáveis sejam mantidas constantes[55], [56].

2.6.1.5 Condutividade

A condutividade de uma solução é determinada pela capacidade de movimento dos iões presentes na solução ou ainda, a facilidade com que a solução é capaz de conduzir uma corrente eléctrica. A maior parte dos polímeros são condutores, com algumas excepções como os materiais dieléctricos, e os iões carregados nas soluções poliméricas são altamente influentes na formação do jacto fibroso.

A condutividade da solução é determinada, principalmente, pelo tipo de polímero, solvente utilizado, e da disponibilidade de sais ionizantes. Verifica-se que com o aumento da condutividade eléctrica da solução, há uma diminuição significativa no diâmetro das nanofibras electricamente fiadas e, por outro lado, com uma baixa condutividade da solução, resulta em insuficiente elongação do jacto para produzir fibras uniformes, e grânulos podem ser observados. Hayati et al. demonstraram que as soluções altamente condutoras são extremamente instáveis na presença de campos eléctricos fortes, o que resulta numa dramática instabilidade do jacto, bem como uma distribuição de diâmetro largo[27]. Geralmente, as nanofibras electrofiadas com menor diâmetro podem ser obtidas com maior condutividade eléctrica e verifica-se que a diminuição no tamanho das fibras é devido ao aumento da condutividade eléctrica. Vários investigadores observaram que o raio do jacto varia inversamente com a raiz cúbica da condutividade eléctrica da solução[25], [47], [56].

2.6.2 Parâmetros do Processo

2.6.2.1 Tensão Aplicada

No processo de electrofição um dos parâmetros mais estudados entre as variáveis controladas é o efeito do campo eléctrico ou da tensão aplicada entre a agulha e o colector. Só depois de alcançar a tensão limiar é que a formação da fibra ocorre, sendo o campo eléctrico

responsável por induzir carga na solução e é iniciado o processo de electrofiação. Já tem sido provado experimentalmente que a forma da gota inicial altera-se com as condições do processo (tensão, viscosidade e taxa de fluxo)[25]. No entanto, existe uma pequena disputa sobre o comportamento da tensão aplicada no processo de electrofiação. Reneker e Chun[57] demonstraram que não há muito efeito do campo eléctrico no diâmetro das fibras de óxido de polietileno produzidas. Os investigadores têm sugerido que, quando tensões mais altas são aplicadas, há mais ejeção de polímero e esta facilita a formação de uma fibra de diâmetro superior[55]. Outros autores relataram que um aumento na tensão aplicada (isto é, através do aumento da intensidade do campo eléctrico), aumenta a força electrostática repulsiva sobre o jacto do fluido que, em última análise favorece o estreitamento do diâmetro da fibra. Na maioria dos casos, uma tensão mais elevada provoca um maior alongamento da solução devido ao forte campo eléctrico e este efeito conduz a uma redução no diâmetro da fibra e também à evaporação rápida do solvente. Com uma tensão mais alta, há também maior probabilidade de formação de grânulos[47]. Comportamento semelhante da tensão aplicada é também observado por Larrondo e Manley[52], onde demonstraram a diminuição do diâmetro da fibra em cerca de metade aumentando o campo eléctrico aplicado para o dobro. Assim, a tensão influencia o diâmetro da fibra, mas o nível de importância varia com a concentração da solução de polímero e da distância entre a ponta da agulha e o colector[58].

2.6.2.2 Fluxo da Solução

O fluxo da solução determina a quantidade de solução disponível para a electrofiação. Na literatura, o número de estudos relacionados com este parâmetro é muito limitado, contudo, relacionam o fluxo da solução com a dimensão e a morfologia das fibras.

A taxa de fluxo do polímero que é ejectado pela seringa é um parâmetro importante do processo uma vez que influencia a velocidade do jacto e a taxa de transferência de material. Uma taxa de alimentação inferior é mais desejável pois o solvente terá tempo suficiente para a evaporação[59]. Deverá haver sempre um caudal mínimo da solução de fiação. Já foi observado que o diâmetro da fibra e o diâmetro dos poros aumenta com o aumento da taxa de fluxo do polímero logo, alterando a taxa de fluxo, é possível alterar ligeiramente a estrutura morfológica das fibras[60]. Taxas de fluxo altas resultam no surgimento de fibras com grânulos devido à indisponibilidade de tempo de secagem adequado antes de alcançar o colector[59], [61], [62].

2.6.2.3 Posicionamento e Diâmetro da Agulha

O posicionamento da agulha numa montagem de electrofiação é adoptado em diferentes perspectivas para a alimentação da solução. O objectivo consiste em ajustar a montagem em função das características da solução polimérica. Alguns autores optam por posicionar o capilar perpendicularmente ao colector, deixando o fluido polimérico cair por acção da gravidade. Noutros casos, o capilar posiciona-se na horizontal de modo que a gota se mantenha na extremidade do capilar com a ajuda da tensão superficial do fluido.

O diâmetro interno da agulha influencia o volume do material submetido ao campo eléctrico. A redução do diâmetro interno da agulha constitui uma forma de reduzir o diâmetro das nanofibras. Quando o volume da gota situada na extremidade da agulha é atenuado, em função da presença do menor diâmetro da agulha, a tensão superficial do fluido aumenta. Desta forma, para uma mesma diferença de potencial aplicada, serão necessárias forças de Coulomb maiores para originar o início do jacto. Como resultado, a aceleração do jacto diminui, consentindo mais tempo para a solução ser alongada antes do contacto com o colector. No entanto, se o diâmetro interno da agulha for extremamente reduzido, dificilmente a solução será expulsa da agulha porque a tensão superficial da solução será muito elevada[4]. Noutra perspectiva, se a diferença de potencial aplicada aumentar, para um menor volume de solução, o diâmetro das fibras diminui.

2.6.2.4 Distância entre a Extremidade da Agulha e o Colector

A distância entre a ponta da agulha e o colector foi examinada por diversos investigadores como uma outra abordagem para controlar os diâmetros e morfologias das fibras geradas por electrofiação. Verificou-se que uma distância mínima é necessária para que as fibras tenham tempo suficiente para secar antes de atingir o colector, caso contrário, com distâncias demasiado perto ou demasiado longe são observados grânulos[49]. O efeito da distância entre a agulha e o colector na morfologia das fibras obtidas não é tão significativo como outros parâmetros[55]. Tem sido relatado que fibras planas podem ser produzidas a distâncias mais estreitas. Um aspecto físico importante das nanofibras produzidas por electrofiação é a sua secagem a partir do solvente utilizado para dissolver o polímero. Assim, deve ser utilizada uma distância óptima entre a ponta e o colector que favoreça a evaporação do solvente das nanofibras.

2.6.3 Parâmetros do Ambiente

Para além dos parâmetros da solução e dos parâmetros do processo existem também os parâmetros ambientais que incluem a humidade, a temperatura ou a pressão atmosférica. Estudos de temperatura foram realizados para examinar os efeitos dos parâmetros ambientais (isto é, temperatura e humidade) sobre o processo de electrofição. Mit-Uppatham et al.[63] investigaram o efeito da temperatura sobre a electrofição de fibras de poliamida-6 variando-a entre 25 e 60°C e descobriram que, com o aumento da temperatura, existe uma diminuição no diâmetro das fibras, concluindo que esta diminuição do diâmetro se deve a uma diminuição da viscosidade da solução de polímero a temperaturas mais altas. Existe então, uma relação inversa entre a viscosidade e a temperatura. A variação de humidade em soluções de poliestireno electrofiadas foi estudada e demonstrou que aumentando a humidade surgem poros circulares na superfície das fibras. Aumentando ainda mais a humidade conduziu aos poros de coalescência[64]. Verificou-se que, com humidade muito baixa, um solvente volátil pode secar rapidamente pois a evaporação do solvente é mais rápida. Por vezes, a taxa de evaporação é tão rápida, em comparação com a remoção do solvente, originando um problema na electrofição do polímero. Como resultado, o processo de electrofição só pode ser realizado durante alguns minutos antes de a ponta da agulha ficar obstruída[25]. Também tem sido sugerido que a humidade elevada pode ajudar a descarga das fibras electrofiadas[2]. Assim, para além dos parâmetros da solução e do processo, os parâmetros ambientais também afectam o processo de electrofição.

2.7 Tipos de montagens

A montagem básica da electrofição caracteriza-se pela simplicidade, fácil funcionalização e possibilidade de adaptação a modelos mais avançados. Em função destas características, a produção de nanofibras realiza-se maioritariamente à escala laboratorial. Contudo, a necessidade de melhorar o processamento com o objectivo de aumentar as funcionalidades das estruturas fibrosas conduziu à introdução de modificações na montagem, em particular na agulha (ou capilar) e no colector.

2.7.1 Tipos de agulhas

Dependendo da aplicação, podem ser utilizadas diferentes configurações das agulhas. Existem configurações com orifício único, capilares dispostos lado a lado, ou capilares coaxiais. A configuração com orifício único é a mais simples e as soluções que fluem através do capilar podem ser soluções de um único polímero ou misturas à base de polímeros solúveis num solvente comum. Embora as misturas de polímeros sejam frequentemente utilizadas pode não ser possível utilizar uma configuração de um capilar com orifício único sendo, dessa forma, proposto por Gupta e Wilkes[50] a divisão de um único capilar contendo soluções dispostas lado a lado. Devido a esta disposição, soluções com condutividades diferentes podem originar cones de Taylor distintos, quando sujeito a um campo eléctrico elevado.

A configuração com capilares coaxiais foi proposta por Wang et al.[65] que demonstra que é possível criar nanotubos utilizando dois capilares concêntricos de diâmetros diferentes, um dentro do outro, fluindo soluções diferentes dentro de cada capilar e originando dessa forma, nanotubos.

A utilização de múltiplos capilares foi também investigada como forma de aumentar o rendimento da electrofiação e poder transportá-la para ambientes industriais. Uma forma de o fazer é introduzir um cilindro perfurado na solução de polímero e fazê-lo rodar. Aplica-se o campo eléctrico entre o cilindro e o colector e as fibras são puxadas das várias perfurações do cilindro em direcção ao colector.

2.7.2 Tipo de colectores

A existência de diversas configurações relativas aos colectores deve-se, em grande parte, à controlabilidade da electrofiação. Sabe-se que a controlabilidade da electrofiação é crítica, ou seja, o comportamento de instabilidade revelada no jacto provoca a deposição caótica ou aleatória das fibras no alvo. Esta situação implica a adaptação de colectores que permitam minimizar o efeito de deposição caótico podendo obter alinhamento das fibras assim como permitir a transferência das estruturas fibrosas. Muitos trabalhos têm emergido neste campo, com o objectivo de resolver estes aspectos, nomeadamente através da aplicação de colectores rotativos, eléctrodos paralelos entre outros. De seguida apresentam-se algumas soluções já investigadas por diversos cientistas com objectivos diferentes.

2.7.2.1 Colectores para alinhamento de fibras

Os colectores normalmente utilizados para o alinhamento de fibras são constituídos por um cilindro rotativo que é girado a uma determinada velocidade. Quando essa velocidade é suficientemente elevada a deposição das fibras é alinhada com o sentido de rotação do cilindro. Na Tabela 2.3 apresentam-se algumas configurações possíveis e as suas vantagens e desvantagens.

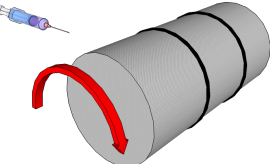
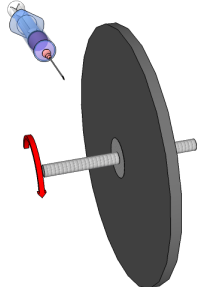
Configuração	Vantagens	Desvantagens
Cilindro rotativo 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração simples • Pode ser fabricada uma grande área de fibras alinhadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Fibras com um alinhamento muito preciso são difíceis de fabricar • Pode ocorrer rotura das fibras se a velocidade de rotação for muito grande
Cilindro rotativo com “fios” 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração simples • É possível obter fibras alinhadas precisamente • Área de alinhamento é ajustável consoante a largura dos “fios” 	<ul style="list-style-type: none"> • Fibras apenas alinhadas sobre os “fios”.
Disco 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração simples • É possível obter fibras alinhadas precisamente 	<ul style="list-style-type: none"> • Quando as fibras são mais largas não consegue manter o alinhamento preciso das fibras.
Tubo rotativo com eléctrodos tipo “faca” 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de obter fibras altamente alinhadas • Fibras cobrem a totalidade do cilindro • Camadas mais altas de fibras alinhadas podem ser obtidas 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração necessita de eléctrodos com tensão negativa para ser eficaz • Só possível para um cilindro de diâmetro pequeno.
Eléctrodos paralelos 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração simples • Fibras altamente alinhadas • Fibras alinhadas são facilmente transportadas para outro substrato 	<ul style="list-style-type: none"> • Camadas mais espessas de fibras alinhadas não são possíveis • Existe um limite para o comprimento das fibras alinhadas

Tabela 2.3 – Tipo de colectores para alinhamento de fibras[66].

2.7.2.2 Colectores para montagem de matrizes de fibras

O tipo de colector da figura é formado por um conjunto de eléctrodos em oposição de 90 graus. O princípio de funcionamento baseia-se na ligação do terminal terra às barras ou eléctrodos, dispostos na mesma linha. As fibras são depositadas nos eléctrodos que estão ligados à terra e essa ligação é comutada entre os pares de eléctrodos com intervalos de tempo definidos, permitindo a formação de uma malha com camadas duplas de fibras. Na Figura 2.9 podem ser observados os diferentes arranjos de fibras em diferentes posições do espaço entre os eléctrodos.

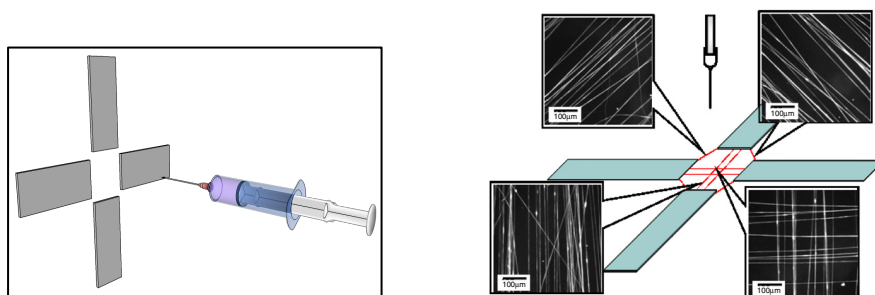


Figura 2.9 – Tipo de montagem com eléctrodos em oposição de 90 graus. Fibras obtidas em diferentes zonas da área de deposição[66].

2.7.2.3 Colectores para novelos de fios

Para produzir novelos de fios são propostas diversas soluções. Na Tabela 2.4 apresentam-se algumas configurações possíveis e as suas vantagens e desvantagens.

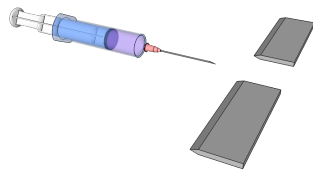
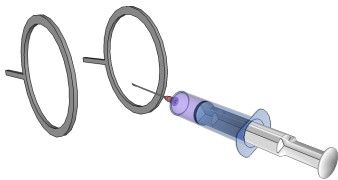
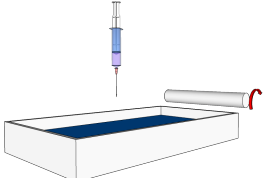
Configuração	Vantagens	Desvantagens
<p>Lâminas em linha</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração Simples • Novelos podem ser facilmente removidos do colector • Novelos estão altamente alinhados 	<ul style="list-style-type: none"> • Novelos têm comprimento limitados • Fibras depositadas têm que ser mergulhadas em água antes de o novelo ser formado
<p>Aneis paralelos</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração simples • Novelos torcidos podem ser fabricados 	<ul style="list-style-type: none"> • Novelos de comprimento limitado • Um dos aneis tem que ser virado para produzir as fibras torcidas.
<p>Banho de coagulação</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuração simples • Novelos contínuos e longos podem ser produzidos • Fibras estão, geralmente, bem alinhadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade de produção é relativamente lenta.

Tabela 2.4 – Tipo de montagens para colectar novelos de fios[66].

2.7.2.4 Colectores para produção em massa

Para a produção em massa de *scaffolds* de nanofibras pode ser adoptada a solução que consta na figura que consiste em utilizar múltiplos capilares de forma a multiplicar a deposição de fibras. Esta configuração (Figura 2.10) tem as vantagens de serem uma configuração bastante simples e a possibilidade de misturar diferentes materiais. As seringas podem ser accionadas individualmente permitindo fluxos diferentes.

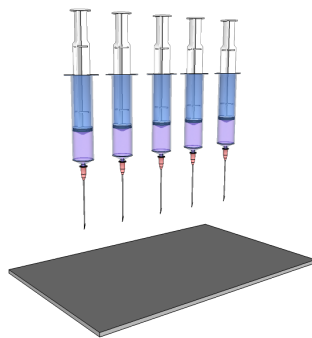


Figura 2.10 – Múltiplas seringas para produção em massa[66].

2.7.3 Configuração do campo eléctrico

A configuração do campo eléctrico utilizado para formar as fibras desempenha um papel importante na electrofiação, pois é esse campo que vai guiar a trajectória das fibras. A utilização de um anel metálico colocado junto à ponta da agulha pode ajudar a homogeneizar o campo eléctrico nessa zona e impedir que as fibras produzidas voltem para trás e se depositem na bomba infusora (Figura 2.11).

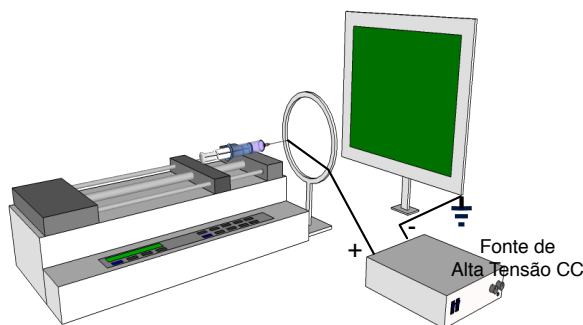


Figura 2.11 – Utilização de anel ligado ao terminal positivo para estabilizar o campo eléctrico[67].

Neste tipo de montagem a agulha e o anel metálico estão ligados electricamente de modo a que o seu potencial seja o mesmo.

O recurso a mais do que um anel metálico é uma outra forma de manipular o campo eléctrico de modo a orientar as fibras para a zona pretendida do alvo (Figura 2.12).

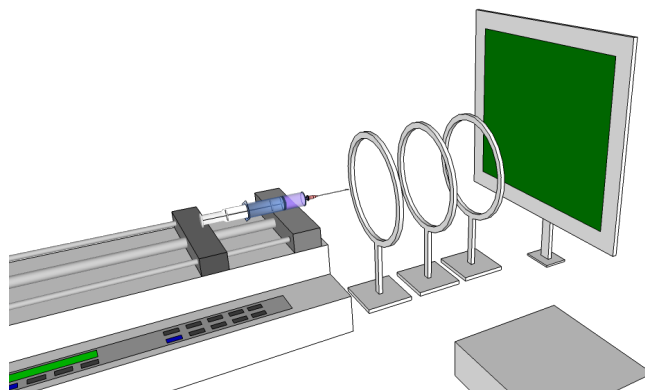


Figura 2.12 – Pormenor da colocação de vários anéis para controlar o campo eléctrico[67].

Nesta configuração, a agulha e os anéis metálicos encontram-se com o mesmo potencial e a presença dos anéis forma uma “parede” eléctrica que contribui para conduzir as fibras para o alvo.

2.8 Várias formas de produzir nanofibras

As nanofibras poliméricas podem ser processadas por várias técnicas como “*Drawing*”, “*Template Synthesis*”, “*Phase Separation*”, *Self-Assembly*, que são brevemente revistas neste subcapítulo. A comparação de várias questões relacionadas com estes métodos de processamento e alguns dos polímeros que podem ser convertidos em nanofibras são mostrados nas Tabelas 2.5 e 2.6, respectivamente. É feita também a comparação com a electrofição.

Processo	Avanços Tecnológicos	Pode ser processado em escala?	Repetibilidade	Controlo das dimensões das fibras
<i>Drawing</i>	Laboratório	✗	✓	✗
<i>Template Synthesis</i>	Laboratório	✗	✓	✓
<i>Phase Separation</i>	Laboratório	✗	✓	✗
<i>Self-Assembly</i>	Laboratório	✗	✓	✗
Electrofição	Laboratório (com potencial para processamento industrial)	✓	✓	✓

Tabela 2.5 – Questões comparativas de várias técnicas de produção de nanofibras[68].

Processo	Vantagens	Desvantagens
<i>Drawing</i>	Equipamento requerido mínimo	Processo descontínuo
<i>Template Synthesis</i>	Fibras de diâmetros diferentes podem ser obtidas facilmente usando <i>templates</i> diferentes	O equipamento utilizado é complexo (molde)
<i>Phase Separation</i>	Equipamento requerido mínimo. O processo pode fabricar matrizes nanométricas directamente. Consistência entre lotes é adquirida facilmente. Propriedades mecânicas das matrizes podem ser ajustadas através da concentração do polímero.	Limitado a polímeros específicos.
<i>Self-Assembly</i>	Bom para obter nanofibras com diâmetros menores	Processo complexo
Electrofiação	Rentável. Podem ser produzidas fibras contínuas e longas	Instabilidade do jacto

Tabela 2.6 – Vantagens e desvantagens das várias técnicas de produção de nanofibras[68].

2.8.1 Desenho de fibras (*Drawing*)

A técnica de produção de nanofibras *Drawing* consiste numa micropipeta com um diâmetro de alguns micrómetros que é aproximada de uma gota de solução de polímero utilizando um micromanipulador (Figura 2.13). É feita a aproximação da micropipeta até tocar na tangente da gota que, após isto, é retirada do líquida e movimentada a uma velocidade de aproximadamente $1 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, cujo resultado é uma nanofibra a ser puxada. Esta fibra é depositada na superfície tocando com a micropipeta nesta. O desenhar de fibras é repetido diversas vezes na mesma gota. O parâmetro mais influente no processo é a viscosidade do material utilizado.

Figura 2.13 – Obtenção de uma nanofibra por *Drawing*[68].

Este procedimento foi reportado por Nain[69] e alguns resultados pelo grupo são apresentados na figura 2.14. As fibras apresentadas são formadas em superfícies com geometrias não planas. A primeira imagem apresenta fibras produzidas num plano com um ângulo recto e a segunda imagem apresenta fibras produzidas num plano curvilíneo.

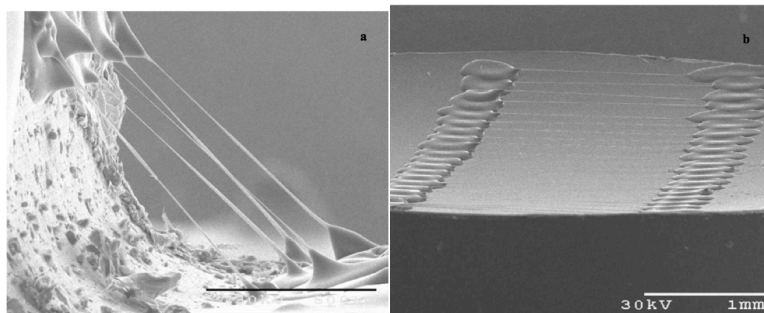


Figura 2.14 – Imagens SEM de nanofibras produzidas por Drawing (a) plano com ângulo recto; (b) plano curvilíneo[69].

2.8.2 Síntese com Molde (*Template Synthesis*)

A produção de nanofibras pelo método *Template Synthesis* requer o uso de um molde para obter uma determinada estrutura de fibras (Figura 2.15).

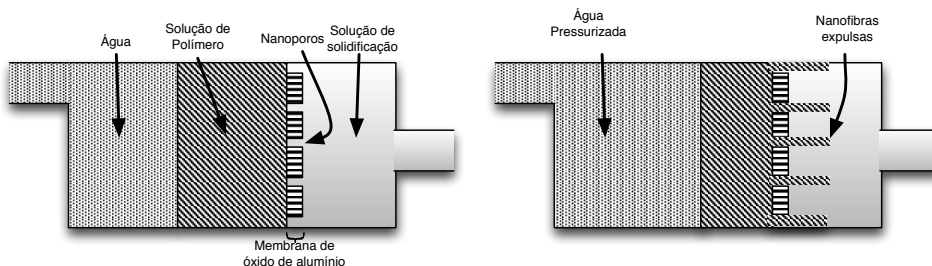


Figura 2.15 – Molde para a produção de nanofibras utilizando Template Synthesis.[68]

O modelo desenvolvido por Feng et al.[70] apresenta uma membrana de óxido de metal (Figura 2.16), com poros de diâmetros na escala nanométrica. Aplicando água pressurizada sobre a solução de polímero, a membrana oferece uma resistência à passagem da solução pelas zonas porosas. Esta acção causa a extrusão do polímero que, ao entrar em contacto com uma solução de solidificação, dá origem às nanofibras, cujos diâmetros são determinados pelos poros.

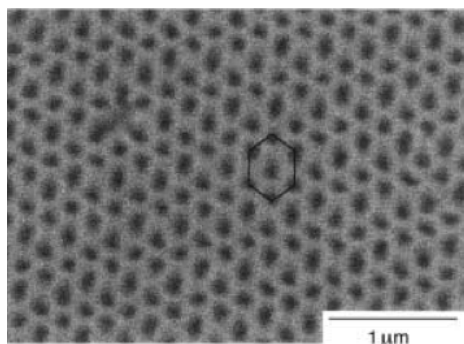


Figura 2.16 – Superfície da membrana de óxido de alumínio[70].

2.8.3 Separação de Fases (*Phase Separation*)

A técnica de *Phase Separation* foi introduzido por Ma e Zhang em 1999 e permite obter redes fibrosas com diâmetros entre 5 e 50 nm[71]. O principal mecanismo deste processo é a separação das fases, devido à incompatibilidade física, onde o solvente se extrai das fases restantes. O procedimento para a produção de nanofibras de PLLA descrito por Ma e Zhang consiste em 5 fases principais: dissolução de polímero, gelificação, extracção de solvente, congelação e secagem do gelo. Uma representação simplificada da técnica de *Phase Separation* pode ser observada na Figura 2.17 e alguns resultados obtidos com este processo podem ser observados na Figura 2.18.

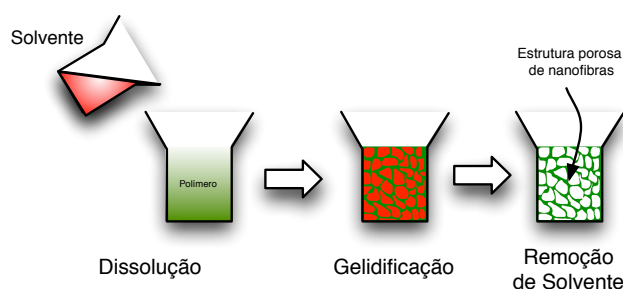


Figura 2.17 – Esquema genérico do processo Phase Separation[68].

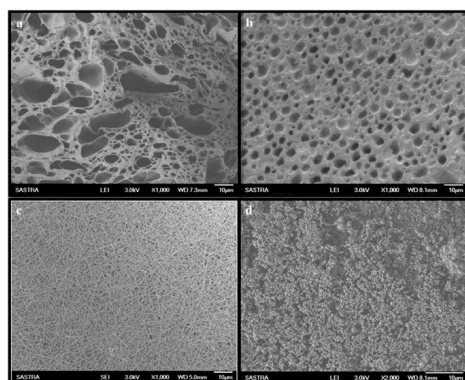


Figura 2.18 – Redes fibrosas obtidas por Phase Separation adaptado de[72].

2.8.4 Automontagem (*Self-Assembly*)

Em geral, o processo *Self-assembly* para fabrico de nanofibras refere-se à construção de fibras à nanoescala utilizando moléculas mais pequenas como blocos de construção básicos[68]. Na Figura 2.19 pode observar-se uma ilustração de crescimento e auto formação das nanofibras através de moléculas de tamanho inferior. Na Figura 2.20 podem observar-se nanofibras obtidas utilizando este método.

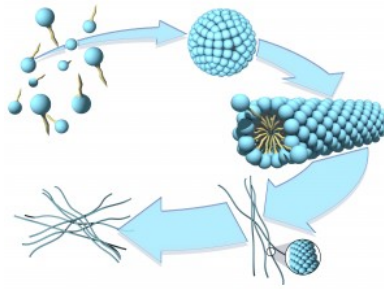


Figura 2.19 – Ilustração do processo de crescimento e autoformação de nanofibras[73].

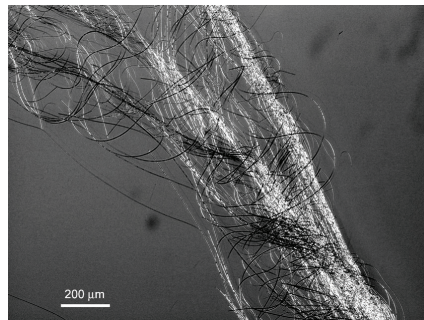


Figura 2.20 – Nanofibras obtidas por self-assembly (adaptado de[74]).

Capítulo 3. Fundamentos Teóricos

Neste capítulo são abordados os conceitos e as noções básicas dos elementos e processos utilizados para o projecto e implementação de um sistema para electrofiação. Os dispositivos e técnicas referidos neste capítulo serão largamente utilizados no capítulo de implementação.

3.1 Motores Passo-a-passo e o seu Controlo

Os motores de passo ou (passo-a-passo) representado na figura 3.1, são dispositivos mecânicos electromagnéticos que podem ser controlados digitalmente através de um *hardware* específico ou através de software. A cada impulso de comando o eixo do motor roda um pequeno ângulo (passo) e permanece estável nessa posição se mais nenhum impulso for aplicado.

São usados em larga escala em impressoras, *scanners*, leitores de disquetes, discos rígidos, etc. Este tipo de motor é utilizado quando existe a necessidade de precisão. Os motores de passo têm um número fixo de pólos magnéticos que determinam o número de passos por volta. Existem vários modelos de motores de passo disponíveis no mercado, os mais comuns têm entre 2 a 72 passos por/volta, significando que levam de 2 a 72 passos para completar uma volta.



Figura 3.1 – Exemplos de motores passo-a-passo.

3.1.1 Tipos de Motores de Passo

Existem, basicamente, três tipos de motores passo-a-passo: íman permanente, relutância variável e híbrido. Todos possuem estator e rotor, diferindo principalmente na constituição do rotor.

3.1.1.1 Motor de Íman Permanente

O estator dos motores de íman permanente (Figura 3.2), de utilização corrente, é formado normalmente por duas secções, cada uma com o seu enrolamento e vários conjuntos de pólos magnéticos (dentes) dispostos radialmente em torno do rotor.

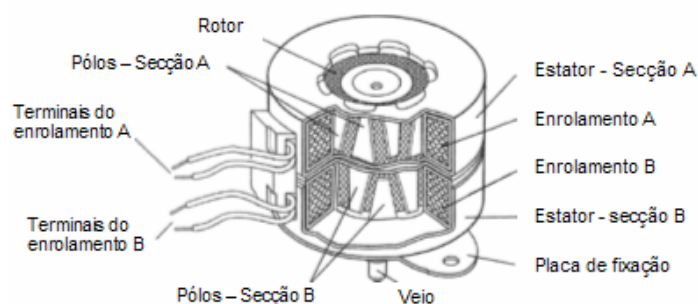


Figura 3.2 – Constituição do motor de íman permanente.

O rotor representado na Figura 3.3 é cilíndrico, não possui dentes, sendo formado por conjunto de ímanes permanentes N-S dispostos radialmente em torno do veio.

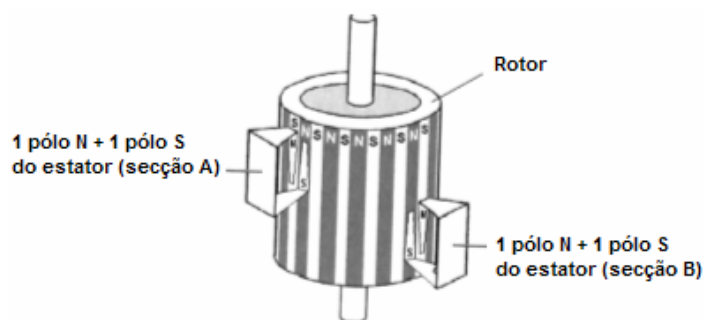


Figura 3.3 – Rotor do motor de íman permanente.

3.1.1.2 Princípio de funcionamento

O motor de íman permanente tem como princípio de funcionamento as leis de atracção e repulsão entre pólos magnéticos. Quando os enrolamentos do estator são alimentados, criam

pólos magnéticos N e S nos dentes de cada secção. Por exemplo, em todos os dentes superiores, de cada secção, pólos N, e em todos os inferiores, pólos S. Como os pólos contrários se atraem, os pólos N de ímanes permanentes do rotor que estiverem mais próximos são atraídos pelos dentes do estator como pólos S e os pólos S do rotor pelos dentes com pólos N, rodando o rotor no sentido de alinhamento dos campos magnéticos.

É neste princípio que se baseia o funcionamento do motor passo-a-passo de íman permanente. Portanto, para fazer rodar o rotor, basta criar um campo magnético rotativo, alimentando sucessivamente os dois enrolamentos do estator (A e B), como se indica na Tabela 3.1.

Passos	Fases			
	A1	A2	B1	B2
1	1	0	0	0
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	0	0	0	1

Tabela 3.1 – Sequência de alimentação dos enrolamentos do motor de íman permanente.

Uma rotação completa é realizada em quatro passos. Se a sequência de alimentação dos enrolamentos for invertida, o rotor roda no sentido horário.

O motor de íman permanente apresenta um bom binário e distingue-se dos de relutância variável porque no movimento manual do veio, mesmo com os enrolamentos desligados, apresenta um ligeiro binário de retenção. Este é devido ao íman do rotor. Estes motores são de construção simples e baixo custo e são usados, principalmente, em aplicações não industriais. O seu grande campo de utilização é em periféricos de computadores: impressoras, fotocopiadoras e *scanners*.

3.1.2 Motor de Relutância Variável

Este tipo de motor possui um rotor constituído por material de boa permeabilidade magnética e um estator com três ou mais enrolamentos (Figura 3.4). Tanto o estator como o rotor possuem pólos salientes (dentes).

3.1.2.1 Princípio de funcionamento

Quando se alimentam os enrolamentos do estator, os dentes deste magnetizam-se e atraem os dentes salientes do rotor que estiverem mais próximos, o rotor roda alinhando os seus dentes com os dentes do estator. O alinhamento dos dentes corresponde a uma posição de

relutância mínima, ou seja, corresponde ao mais fácil caminho para as linhas de força do campo magnético.



Figura 3.4 – Aspecto interior de um motor de relutância variável com três fases.

A relutância do circuito magnético, no equivalente magnético da resistência de um circuito eléctrico, é mínima quando a distância entre os dentes do estator e do rotor também o for.

A indutância do enrolamento que está alimentado varia enquanto o rotor gira. Se os dentes não estão alinhados, a indutância é baixa e a corrente aumenta rapidamente. Quando os dentes estão alinhados, a indutância é grande e a corrente diminui. Esta é uma dificuldade no controlo de motores de relutância variável.

No estator destes motores existem, tipicamente, três conjuntos de enrolamentos, A, B e C, cada qual com duas bobinas colocadas em pólos diametralmente opostos e ligadas em série, formando uma fase. O rotor rodará alimentando sequencialmente os enrolamentos do estator com uma tensão contínua como está representado na Tabela 3.2.

Passos	Fases		
	A	B	C
1	1	0	0
2	0	1	0
3	0	0	1
4	1	0	0
5	0	1	0
6	0	0	1
...	1	0	0

Tabela 3.2 – Sequência de alimentação dos enrolamentos do motor de relutância variável.

Continuando a alimentar sucessivamente as bobinas A, B e C, o rotor desloca-se um passo de 30° no sentido anti-horário. Uma rotação completa do rotor corresponde a 12 passos.

Como o motor de relutância variável não se baseia nas leis da atracção e repulsão entre pólos magnéticos, mas sim no princípio da relutância mínima, o sentido de passagem da corrente nos enrolamentos é diferente. Estes motores não possuem íman permanente no rotor, por isso, o rotor move-se livremente, não tendo binário de retenção. Esta é uma das formas de distinguir este motor dos motores de íman permanente e híbridos; nestes, o rotor possui um pequeno binário de retenção. Os motores de relutância são menos utilizados que os motores de íman permanente. A sua principal utilização é em aplicações de precisão com binários muito reduzidos.

3.1.3 Motor Híbrido

A construção dos motores de ímã permanentes com ângulos de passo abaixo de $7,5^\circ$ é de alguma complexidade. Esta situação é ultrapassada com o motor híbrido, representado na Figura 3.5. Este combina os princípios do motor de ímã permanente e do motor de relutância variável. O motor híbrido tem um pequeno ângulo de passo (tipicamente $1,8^\circ$) e um binário elevado num motor relativamente pequeno.

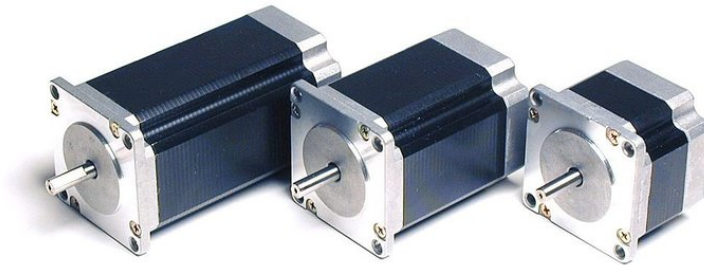


Figura 3.5 – Motores híbridos comerciais.

O motor híbrido possui um roto constituído por um ímã permanente e massas polares, com dentes, acopladas aos pólos do ímã (Figura 3.6).

O estator possui tipicamente dois enrolamentos com várias bobinas e pólos magnéticos com dentes. Estes pólos estão dispostos em frente dos dentes das massas polares do rotor.

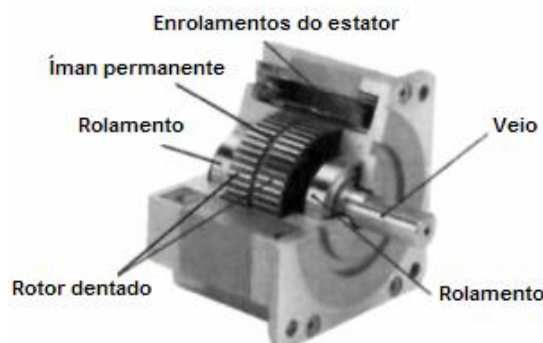


Figura 3.6 – Constituição do motor híbrido.

Este motor possibilita realizar passos muito reduzidos com um binário bastante elevado, reunindo as vantagens do motor de ímã permanente e do motor de relutância variável, tornando-se por isso, dos motores de passo-a-passo mais utilizados em aplicações industriais.

3.1.3.1 Princípio de funcionamento

O motor híbrido combina o modo de funcionamento do motor de ímã permanente e do motor de relutância variável.

O seu rotor é constituído por massas polares acopladas a um íman permanente e possuem: uma, um pólo N, e outra, um pólo S.

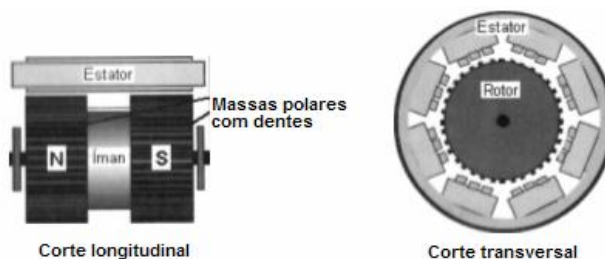


Figura 3.7 – Vista em corte do motor híbrido.

O estator deste motor possui quatro dentes e dois enrolamentos (Figura 3.7). O rotor tem um total de seis dentes: três nas massas polares anteriores, com polaridade N, acoplados ao pólo N do íman permanente, e três, nas massas polares posteriores, com polaridade S, acoplados ao pólo S do íman. Os dentes posteriores estão posicionados a meio do intervalo dos anteriores. Se os enrolamentos do estator forem alimentados com a sequência de impulsos indicados na Tabela 3.3, a sequência da sua rotação é indicada na Figura 3.8.

Passos	Fases			
	A1	A2	B1	B2
1	1	0	0	0
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	0	0	0	1

Tabela 3.3 – Sequência de alimentação dos enrolamentos do motor híbrido.

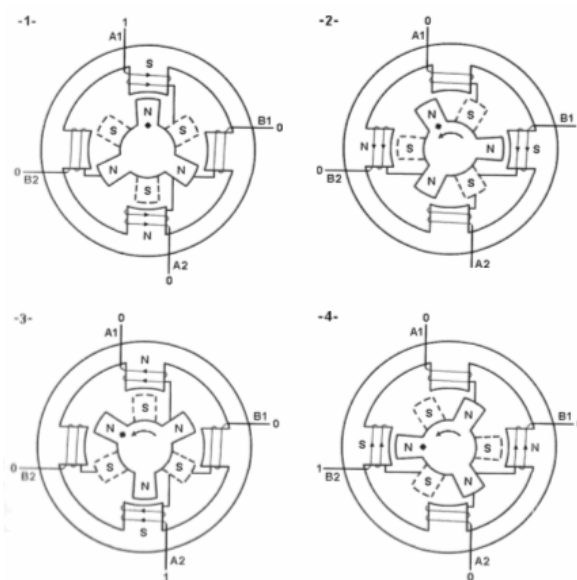


Figura 3.8 – Funcionamento do motor híbrido.

O funcionamento do motor híbrido processa-se de acordo com os seguintes passos:

- Passo 1: Alimentando o enrolamento A do estator, no sentido indicado, é criado no dente superior um pólo S e no dente inferior um pólo N. Pelo pólo S é atraído o dente anterior N do rotor e pelo pólo N o dente posterior S.
- Passo 2: Alimentando o enrolamento B, no sentido indicado, é criado no dente lateral direito do estator um pólo S e no dente lateral esquerdo um pólo N. Pelo pólo S é atraído o dente anterior N do rotor que estiver mais próximo e pelo pólo N o dente posterior S do rotor que estiver mais próximo. O rotor desloca-se 30° no sentido anti-horário.
- Passo 3: Alimentando novamente o enrolamento A, mas agora com corrente em sentido contrário, é criado no dente superior um pólo N e no dente inferior um pólo S. Pelo pólo N é atraído o dente posterior S que estiver mais próximo e pelo pólo S o dente anterior N mais próximo. O rotor desloca-se mais 30° no sentido anti-horário.
- Passo 4: Alimentando agora o enrolamento B com corrente em sentido contrário, é criado no dente lateral direito um pólo N e no dente lateral esquerdo um pólo S. Pelo pólo N é atraído o dente posterior S que estiver mais próximo e pelo pólo S o dente anterior N que estiver mais próximo. O rotor desloca-se mais 30° no sentido anti-horário.

Nesta fase, o rotor deslocou-se no sentido anti-horário 90°. Continuando a alimentar os enrolamentos com a mesma ordem (1, 2, 3, 4), o rotor continua a rodar no sentido anti-horário. Uma rotação completa do rotor corresponde a 12 passos. Caso se pretenda que o rotor rode em sentido horário, basta trocar a sequência de alimentação dos enrolamentos, ou seja, alimentar os enrolamentos pela seguinte ordem (1, 4, 3, 2).

Os motores híbridos utilizados nas aplicações práticas possuem um número de dentes muito superior ao utilizado no exemplo para explicar o funcionamento. É vulgar apresentarem 200 dentes ou mais. Também podem possuir um rotor com vários ímanes permanentes intercalados entre massas polares. Neste caso, os dentes de cada massa polar estão fisicamente desencontrados, o que possibilita ângulos de passo extremamente pequenos.

Os motores híbridos, tal como os de íman permanente, apresentam um pequeno binário de retenção. O veio ao ser rodado manualmente apresenta uma força de oposição ao movimento, que se deve à atracção entre o íman permanente do rotor e os pólos do estator.

3.1.4 Modos de alimentação dos motores passo-a-passo

Os motores de passo são caracterizados quanto à sua alimentação por duas formas: Unipolar e Bipolar.

3.1.4.1 Unipolares

Neste tipo de alimentação (Figura 3.9), a corrente de excitação que circula nos enrolamentos do estator do motor é sempre no mesmo sentido. Este tipo de motor pode possuir cinco, seis ou oito condutores, ligador como se mostra na figura seguinte. Os usuais possuem cinco ou seis condutores e são formados por dois enrolamentos iguais com ponto médio comum (cinco condutores) ou separado (seis condutores). São motores de quatro fases.

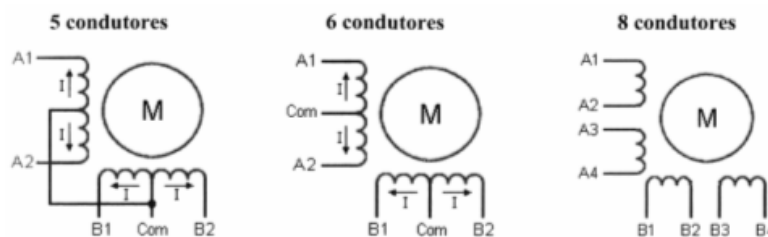


Figura 3.9 – Enrolamentos do motor com alimentação unipolar.

O ponto médio dos enrolamentos destes motores é ligado à tensão positiva da fonte de alimentação e os terminais dos extremos à tensão negativa. A corrente circula do comum para os terminais dos extremos.

Nos motores com seis terminais de ligação, não utilizando o ponto médio, os enrolamentos ficam ligados em série, podendo o motor funcionar como bipolar. Nos motores com oito terminais é possível a ligação em série ou em paralelo entre os enrolamentos. A configuração unipolar nos enrolamentos simplifica, quando se utilizam componentes discretos no circuito de comando do motor.

3.1.4.2 Motores Bipolares

Neste modo de alimentação o estator do motor possui dois enrolamentos iguais, circulando a corrente de excitação neles, ora num, ora noutro sentido. Estes motores possuem quatro condutores de ligação, duas fases (Figura 3.10).

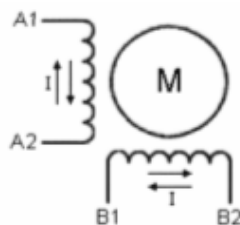


Figura 3.10 – Disposição dos enrolamentos de um motor com alimentação bipolar.

Dado que a corrente pode circular, em cada enrolamento, nos dois sentidos, uma vez cria um campo magnético com uma polaridade, outra vez com polaridade contrária. O motor com alimentação bipolar é de construção mais simples que o motor unipolar e, para o mesmo tamanho, possui um binário mais elevado. Apresentam como vantagens os seguintes aspectos:

- Menor custo, se a aplicação puder ser realizada com motor de passo;
- Isento de manutenção, não há escovas ou outras partes sujeitas a desgastes, não necessitando portanto de manutenções periódicas;
- Estabilidade nas paragens, sem comutação na corrente de fase o rotor permanece completamente parado. Não há tendência do rotor se agitar em torno de uma posição do *encoder*;
- Industrialmente padronizado, são fabricados com eixo ou face padronizados (Norma NEMA ou Métrico) sendo portanto facilmente substituíveis;
- Baixa limitação pelo ambiente, podem ser usados em quase todos os ambientes (inclusive no vácuo);
- Isento de erros, não há erros no drive de modo a gerar a perda de controlo do movimento. Pelo contrário, em tais situações há a tendência do rotor parar (ao contrário do que pode acontecer nos sistemas servo controlados);
- Dificilmente desmagnetizável, elevados níveis de corrente não causam desmagnetização dos seus materiais (ao contrário do que pode ocorrer com os motores com escova);
- Seguros e fiáveis, os motores passo-a-passo são bastante simples sob o ponto de vista construtivo, praticamente isentos de falhas;
- Resistentes a sobrecargas, não há elevação da corrente no motor quando em situações de sobrecarga como ocorrem nos servomotores;
- Relação (binário/dimensão), comparativamente com os motores DC (com escovas), do mesmo tamanho, o motor de passo pode fornecer altos binários de saída em baixas velocidades;
- Ligação simples, são necessárias apenas quatro vias de alimentação, o que pode ser uma vantagem em situações onde as conexões tenham elevados custos.

Apresentam como desvantagem os seguintes aspectos:

- Perda de suavidade para baixas velocidades, sendo o maior problema dos motores de passo. Porém, pode ser solucionado com *drivers* de micro-passo;
- Perda de posicionamento em malha aberta, pode ocorrer em situações de sobrecarga. Um *encoder* para confirmação de passo poderia resolver o problema, porém, neste caso, seria preferível o uso de um servomotor;

- Corrente nominal mesmo quando está parado, como o binário de retenção exige circulação de corrente, isto causa aquecimento do motor mesmo quando parado;
- Possibilidade de ocorrência de fenómenos de ressonância, a baixas velocidades;
- O binário diminui com o aumento da velocidade.

3.2 Binário

O binário do motor é a medida do esforço necessário para fazer girar um eixo, e é dado pela seguinte equação:

$$T = F.Raio (N.m)$$

No caso de qualquer motor, o binário de arranque deve ser maior do que o binário existente acoplado ao eixo. Após um certo tempo do motor ter arrancado à velocidade nominal, este alcança a velocidade nominal, há o encontro das curvas de binário do motor e do binário resistente. Na curva representada a seguir (Figura 3.11) verifica-se que, quando a carga mecânica no eixo varia por algum motivo, o binário motor também varia, e consequentemente a velocidade de rotação do motor também varia. Por exemplo, se a carga mecânica diminui, o binário do motor também diminui e a velocidade aumenta, estabilizando num novo regime.

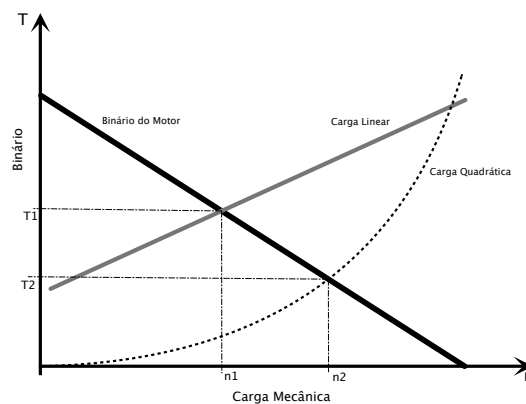


Figura 3.11 – Evolução do binário do motor em função carga mecânica.

3.3 Modulação por Largura de Pulsos (PWM)

A técnica de modulação por largura de impulsos (*Pulse Width Modulation* – PWM) consiste na variação da largura do impulso ou *Duty-Cycle*, mas mantendo o período e a amplitude do sinal constantes, tal como está representado na Figura 3.12.

Esta técnica é muito utilizada para o controlo da velocidade de motores, em fontes comutadas, para o controlo da intensidade do brilho de *LEDs* e lâmpadas, entre outras, sendo estas apenas algumas das aplicações deste tipo de técnica.

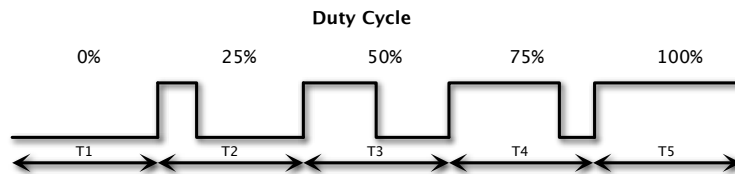


Figura 3.12 – Sinal de PWM para 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de duty-cycle ($T1 = T2 = T3 = T4 = T5$).

A grande vantagem do uso de circuitos PWM como controladores em relação aos circuitos resistivos é a sua eficiência. Enquanto a eficiência da técnica do PWM é de praticamente 1, possuindo menos de 1% de perda, o circuito resistivo trabalha a 50% da carga (50% vai realmente para a alimentação da carga e 21% é dissipado por aquecimento nas resistências). Uma outra grande vantagem consiste no facto de na modulação de largura de pulso, os pulsos estarem com o valor nominal de pico, gerando um maior binário nos motores ao contrário de um controlador resistivo, já que deverá ter uma tensão reduzida, podendo causar a paragem do motor devido ao binário reduzido. Além disso, podem usar-se potenciómetros menores para controlar cargas variadas, ao contrário dos resistivos que usam potenciómetros de maior dimensão e mais dispendiosos.

Uma das desvantagens do PWM é a possibilidade de gerar ruído electromagnético mais conhecido como EMI. Este efeito indesejado pode ser minimizado colocando o controlador perto da carga e em alguns casos recorrendo a filtros adicionais.

3.4 Motor de CC sem escovas

O motor de CC sem escovas (*Brushless DC Motor*) é uma máquina eléctrica em que a operação de comutação, realizada mecanicamente pelo colector no motor de CC, é aqui efectuada por um comutador electrónico, daí este tipo de motor não possuir colector nem escovas.

Este tipo de motor possui um rotor com magnetos permanentes, que podem estar colocados no interior ou no exterior do estator, e um estator de material ferromagnético com os respectivos enrolamentos (Figura 3.13). Esta configuração, relativamente ao motor de magnetos permanentes, está invertida.

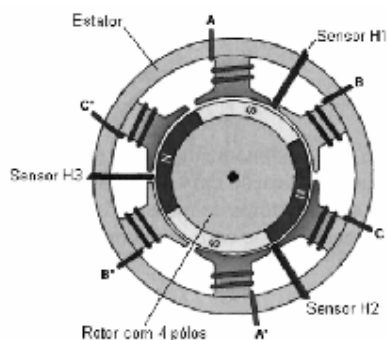


Figura 3.13 – Constituição de um motor de CC sem escovas.

O estator de um motor de CC sem escovas, para accionamentos industriais, é constituído por lâminas de chapa de aço empilhadas, com os enrolamentos colocados nos entalhes e dispostos axialmente na periferia interna, tal como está representado na Figura 3.14. O estator assemelha-se ao de um motor de indução, contudo, os enrolamentos são distribuídos de forma diferente.

Os sensores indicados na Figura 3.13 detectam o campo magnético, são de efeito de Hall, ou seja, estando na presença de um campo magnético geram aos seis terminais uma tensão eléctrica, de modo a informar, neste caso, o controlador electrónico sobre a posição dos pólos do rotor.

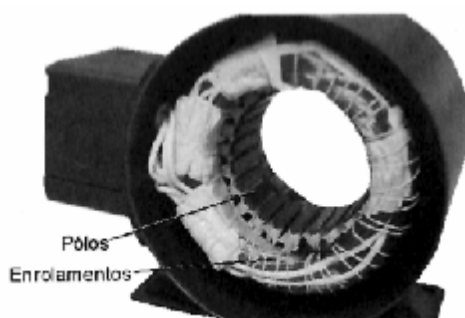


Figura 3.14 – Aspecto do estator de um motor industrial de CC sem escovas.

Tipicamente, os motores industriais de CC sem escovas têm enrolamentos de três fases ligados em estrela, sendo cada fase constituída por várias bobinas e respectivos pólos magnéticos. O rotor de um motor de CC sem escovas é constituído por magneto permanente e pode possuir vários pares do pólo, alternadamente N-S.

Ao contrário de um motor de CC com escovas, a comutação do motor sem escovas é realizada electronicamente. Para que o motor rode, os enrolamentos do estator têm de ser alimentados com tensão contínua com uma determinada sequência. Deste modo, são criados sequencialmente pares de pólos N-S no estator que atraem os pólos S-N do rotor, e este entra em rotação.

A sequência a aplicar terá de fazer rodar o rotor, num sentido ou noutro, para tal, é necessário conhecer-se a sua posição para determinar qual ou quais os enrolamentos que devem ser alimentados.

A posição do rotor é detectada, tipicamente, por sensores de efeito de Hall. Normalmente em motores industriais existem três destes sensores colocados no estator. Sempre que os pólos magnéticos do rotor são detectados por estes sensores a electrónica de comando é informada sobre a posição do rotor.

Baseado na combinação dos sinais fornecidos pelos três sensores (H1, H2 e H3), o controlador electrónico determina a sequência de alimentação a aplicar aos enrolamentos (fase) do estator para que o rotor rode no sentido desejado e à velocidade pretendida.

O circuito de controlo destes motores permite a regulação de vários parâmetros do motor, tais como: velocidade, sentido de rotação e binário.

Na Figura 3.15 está representado um circuito de comando típico de um motor *Brushless* com um estator com três fases ligadas em estrela.

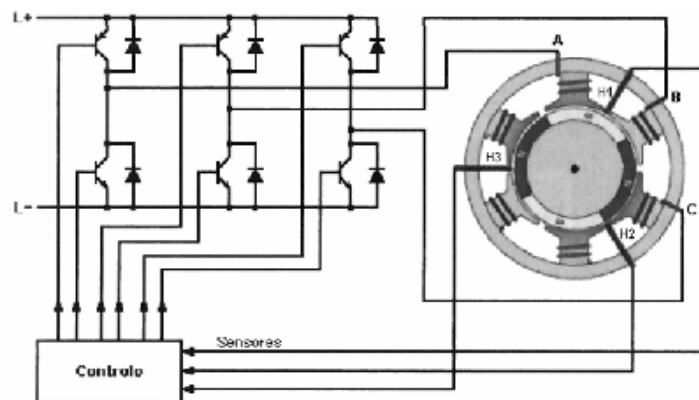


Figura 3.15 – Circuito de comando típico de um motor *Brushless* com três fases.

Estes motores apresentam uma baixa manutenção, uma operação silenciosa, um bom rendimento, uma vida útil longa, gama extensa de velocidades e devido ao facto de não possuírem escovas, um desgaste mecânico reduzido e interferências electromagnéticas (EMI) muito baixas. Pelo facto de serem constituídos por um rotor mais leve, constituído por magnetos permanentes, a inércia, comparada com rotores de núcleo de ferro, é menor. Isto melhora as características de aceleração, de travagem e a eficiência energética. A necessidade de um controlador electrónico para funcionarem é a sua desvantagem, uma vez que aumenta o custo do projecto.

As aplicações dos motores sem escovas incluem entre outras: compressores, ventoinhas, máquinas de lavar, etc.

Actualmente, estes motores, com o respectivo controlador, também dominam muito o *hardware* existente no computador, nomeadamente os discos duros, leitores de CD, leitores de DVD e ventoinhas de refrigeração.

A eficiência elevada, baixa manutenção e o tamanho reduzido destes motores torna-os especialmente indicados para aplicações em que a fiabilidade seja um ponto importante.

Devido às suas características, os motores de CC sem escovas têm vindo a substituir os motores de CC com escovas em variadíssimas aplicações.

3.5 Microcontrolador

O surgimento do microprocessador teve um grande impacto no mercado de electrónica digital. Os desenhos de equipamento dos mais variados tipos foram revolucionados e conseguiu-se fornecer aos equipamentos que eram convencionais, aquilo que é normalmente apelidado de inteligência, flexibilizando a operação e aumentando as capacidades e a performance do equipamento.

Actualmente, já se torna bastante difícil encontrar dispositivos que não possuam alguma espécie de microprocessador. De facto, integrando numa pequena pastilha de silício um conjunto de recursos muito variado (CPU, memória, unidade aritmética, I/O digitais e/ou analógicas, comunicação série/paralelo, entre outros), o projecto de sistemas baseados em microprocessador tornou-se económico, flexível e comparativamente mais rápido do que até então se conseguia fazer.

A revolução que o microprocessador provocou nos novos equipamentos foi acompanhada por uma revolução na metodologia de projecto que passou por envolver fases até então inexistentes. O projecto de uma arquitectura baseada em microprocessador é dividido em três grandes áreas:

- O desenho do *hardware* necessário para que o microprocessador possa desempenhar normalmente as suas funções (base de tempo, memória, I/O, entre outros);
- O desenho do *hardware* específico que define a natureza do equipamento e que deverá ser desenhado para poder dialogar directamente com o sistema de controlo do ponto anterior;
- O desenho do *software* que funcionará no sistema de controlo e que permitirá que o sistema seja utilizado por um utilizador humano com maior ou menor flexibilidade e segurança.

Nesta dissertação utilizou-se uma plataforma integrada de desenvolvimento baseada num microcontrolador (Arduino). Embora a análise da estrutura que distingue um microprocessador de um microcontrolador fique fora dos objectivos deste trabalho, pode adiantar-se que, de uma maneira simples, o microcontrolador integra muitas das características funcionais de um sistema baseado num microprocessador, juntando todas essas características

num único circuito integrado, o que proporciona o desenho com microcontrolador mais económico e muito mais compacto.

3.5.1 Arduino

O Arduino[75] é uma plataforma de desenvolvimento que contém um Microcontrolador da Atmel AVER, sendo bastante utilizada devido ao seu baixo preço e à sua simplicidade, quer a nível de hardware como a nível de software. O Arduino pode receber uma vasta gama de entradas analógicas e digitais, barramento SPI e I2C, interface série, podendo as suas saídas serem digitais ou analógicas (baseado em PWM).

As ferramentas de desenvolvimento para o Arduino são vocacionadas para a linguagem C/C++, existindo na comunidade Arduino bastantes exemplos e código fonte disponíveis e prontos a ser utilizados. Esta comunidade tem vindo a crescer, permitindo a sua utilização a nível profissional como amador.

O seu ambiente de desenvolvimento (*Integrated Development Environment* – IDE), Figura 3.16, é prático e beneficia da incorporação de uma vasta gama de exemplos. A transferência de código para o microcontrolador é feita através de uma conexão USB e existe ainda a opção de visualização de uma janela para comunicação série de entrada e saída de dados.

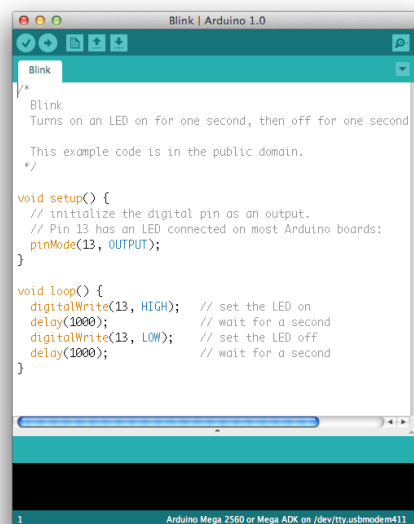


Figura 3.16 – Arduino IDE.

Caso o programador necessite de uma aplicação de mais alto-nível, com ambiente gráfico e utilizando animações, imagens, interações, poderá utilizar a linguagem e ambiente de programação *Processing*. O *Processing* permite programas interactivos em 2D, 3D e saída PDF, utilizando a biblioteca de funções *OpenGL* para os programas 3D[76].

O Arduino tem ainda uma particularidade, que o torna ainda mais interessante, os *Shields*. São pequenas placas PCB com electrónica embebida e com a mesma disposição de pinos do Arduino, bastando apenas encaixar o *Shield* na plataforma para assim aumentar as suas funcionalidades. Existem numerosos *shields* disponíveis, cada um deles com uma particular aplicação, desde módulos de MP3, Comunicação Ethernet, LCD, *drivers* para controlo de motores, entre outros. Cada um destes possui bibliotecas de funções próprias que facilitam a sua utilização.

3.5.1.1 Arduino Mega 2560

Existem várias plataformas de desenvolvimento da família Arduino, no entanto, para este projecto foi escolhido o Arduino Mega 2560. De entre muitos factores, alguns dos mais relevantes para a sua escolha foram o número e resolução dos módulos PWM existentes, assim como o seu preço. As suas principais características estão descritas na Tabela 3.4.

Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de Operação	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7 – 12 V
Tensão de entrada (limites)	6 – 20 V
Pinos digitais I/O	54 (14 dos quais podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógicos	16
Corrente DC por pino I/O	40 mA
Corrente DC por pino 3,3 V	50 mA
Memória Flash	256 KB com 8 KB usados pelo bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade de Relógio	16 MHz

Tabela 3.4 – Características principais do Arduino Mega 2560.

O Arduino Mega (Figura 3.17) pode ser alimentado através da ligação USB ou por fonte de alimentação externa. A fonte de alimentação é seleccionada automaticamente. Em relação aos pinos de Entrada e Saída, o Arduino Mega possui várias características relevantes.

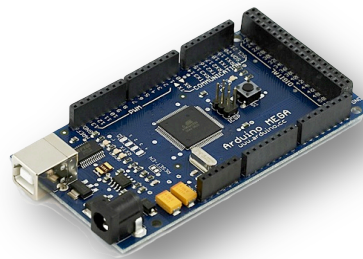


Figura 3.17 – Placa Arduino Mega 2560.

Todos os pinos digitais podem ser usados como ligação de entrada ou saída, sendo configuráveis pelo *software* de desenvolvimento e todos operam em lógica TTL. Além disso, alguns pinos podem ser usados para algumas funções especiais:

- Comunicação série – é possível utilizar quatro ligações diferentes via comunicação série;
- Rotinas de Interrupção – O Arduino fornece seis pinos que permitem utilizar serviços de interrupção externos.
- PWM – A placa fornece 14 pinos que podem ser utilizados para modulação por largura de impulsos.

O Arduino Mega 2560 oferece ainda a possibilidade de utilizar 16 pinos como portas analógicas, providenciando dez bits de resolução (e.g. 1024 níveis diferentes), correspondendo a uma tensão entre 0 e 5 V. Estes pinos permitem fazer aquisição de sinal dos mais variados sensores analógicos, como temperatura, pressão ou humidade, etc.

3.5.1.2 Comunicação

O Arduino Mega 2560 possui diversas características que permitem que este comunique com um computador, outro Arduino, ou mesmo outros microcontroladores. O microcontrolador ATmega2560 fornece quatro portas UART para comunicação série TTL (5 V). Uma dessas portas fornece um canal de comunicação utilizando a porta USB e adiciona uma porta COM virtual para comunicar com um computador.

3.6 Sensores Ópticos (Sensores de fim de curso)

Os sensores ópticos (Figura 3.18) têm como principal função a prevenção de danos estruturais do protótipo. Outra das funções destes sensores é a possibilidade de calibração. Esta rotina faz com que os três eixos se movam num sentido até atingir o sensor de fim de curso inferior. Nessa altura, inverte o sentido até que o sensor de fim de curso superior seja atingido. Entre os dois sensores é contado o número de passos efectuados pelo motor e, sabendo a distância entre sensores, é calculada a correspondência entre um passo do motor e a respectiva distância real.



Figura 3.18 – Sensor óptico utilizado neste trabalho.

Os sensores ópticos são compostos, cada um, por um díodo emissor de infravermelhos e por um foto-transístor. Quando o feixe de luz do díodo emissor é interrompido pela aproximação de uma superfície reflectora, a tensão no transístor é alterada e é efectuada uma mudança de nível e, assim, é transmitido um sinal TTL ao pino do microcontrolador correspondente.

Capítulo 4. Projecto e Implementação

O objectivo deste capítulo é fazer uma apresentação e justificação das opções tomadas ao nível do *hardware* constituinte do sistema desenvolvido para a automatização da produção de micro e nanofibras por electrofiação.

O capítulo começa por apresentar a arquitectura da máquina desenvolvida e o seu modo de operação. Na secção seguinte apresenta-se o *hardware* seleccionado, começando pelos dispositivos já disponíveis no laboratório e que não foram alvo de alterações. De seguida apresentam-se os dispositivos utilizados para desenvolver o sistema de 3 eixos cartesianos descrevendo os motores utilizados, as suas controladoras e os sensores de posição utilizados.

Por fim, são descritos os equipamentos utilizados no controlo do processo, nomeadamente o microcontrolador que faz a ligação entre a interface do utilizador num computador e a máquina de posicionamento do alvo. Descrevem-se também as razões da escolha dos mesmos e as suas características.

4.1 Modelo de Arquitectura

Nas montagens tradicionais de electrofiação é frequente a manipulação e monitorização dos dispositivos pelo método manual. A tensão da fonte é variada através de um potenciómetro, a distância e o posicionamento da agulha são ajustados manualmente, assim como o controlo dos dispositivos de infusão.

Apesar de esta montagem continuar a ser bastante utilizada, afigura-se algo redutora quando se pretende testar deposições em condições ambientais monitorizadas pelo utilizador, ou ainda dotar o sistema de autonomia e, ao mesmo tempo, garantir a protecção das pessoas.

No protótipo que se implementou, embora a complexidade do sistema seja mais visível, o controlo e a monitorização da estrutura torna-se mais acessível ao utilizador, através de um único terminal de comando (Computador). O modelo de arquitectura proposto para este projecto pode ser observado na Figura 4.1.

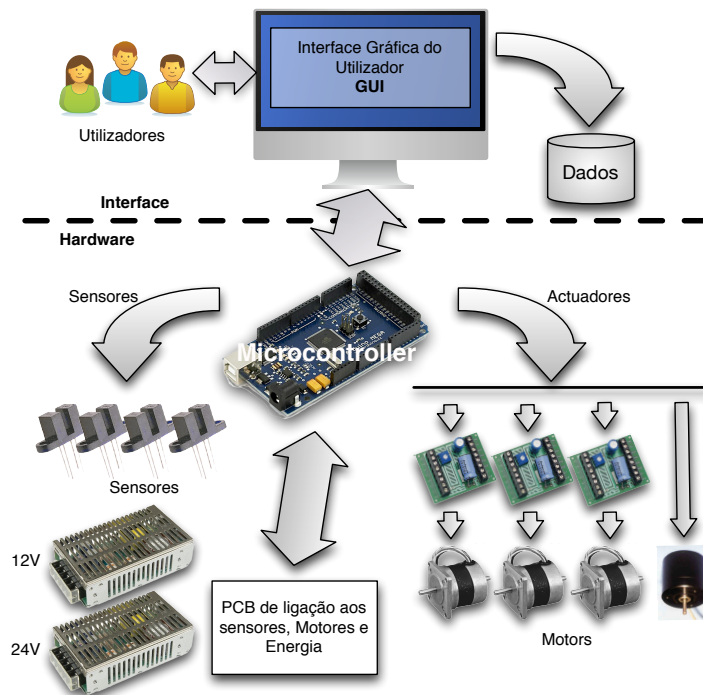


Figura 4.1 – Arquitectura de modelo proposto para implementação.

A unidade de microcontrolador Arduino é responsável pela interface entre o ambiente gráfico presente no PC e os circuitos periféricos, nomeadamente a placa de circuitos que faz a ligação aos sensores, às controladoras dos motores e às fontes de alimentação externas.

Ao microcontrolador compete a tarefa de accionar os motores de acordo com as especificações ditadas pela interface de utilizador, observar os sensores de posicionamento e comunicar com a interface sobre o estado do sistema físico.

4.2 Equipamento disponível não sujeito a alterações

No laboratório onde é instalado o protótipo para electrofiação existe algum equipamento que, devido a restrições orçamentais, foi adaptado ao novo sistema desenvolvido mas não foi alvo de modificações. Esses equipamentos são a fonte de alta tensão e a bomba infusora. Dadas as características destes equipamentos, nomeadamente a não integração de capacidades de comunicação com um computador, não foi possível englobar estes dispositivos no sistema

integrado de electrofiação sendo o seu controlo efectuado manualmente. Sendo estes dispositivos estáticos, do ponto de vista de automatização, o protótipo foi desenvolvido com vista a possibilitar a movimentação do alvo onde as fibras são depositadas.

4.2.1 Bomba de Infusão

A bomba infusora disponível é um modelo da *KD Scientific* (KD-100) que permite o accionamento de uma seringa com simplicidade e precisão. O modelo permite utilizar seringas desde 10 μl até 60 ml de qualquer fabricante. O seu funcionamento é simples sendo accionada através de um pequeno menu que permite seleccionar:

- Tamanho da seringa através de uma tabela;
- Volume contido na seringa;
- Caudal de infusão do fluido.

Outras características da bomba de infusão são a possibilidade de seleccionar a unidade do caudal de infusão em $\mu\text{l}/\text{hora}$ ou ml/hora automaticamente através da seringa seleccionada e a memorização da última configuração utilizada. A Figura 4.2 apresenta a bomba utilizada.



Figura 4.2 – Bomba de infusão KD Scientific (KD-100).

4.2.2 Fonte de Alta Tensão

A fonte de alta tensão disponível no laboratório (ver Figura 4.3) é o modelo da *Glassman HV EL30P1.5* que fornece polaridade positiva com uma tensão de saída entre os 0 e os 30kV em corrente contínua. A corrente máxima de saída é de 1,5mA. Esta fonte de tensão fornece boa performance com baixo custo disponibilizando apenas as funcionalidades de alteração da tensão de saída e dois mostradores digitais que informam sobre as tensões e correntes de saída.



Figura 4.3 – Fonte de Alta Tensão Glassman EL30P1.5.

4.3 Hardware seleccionado

Nas secções seguintes descreve-se o *hardware* seleccionado para a implementação do protótipo para electrofiação, onde é explicado o funcionamento e a função de cada um dos equipamentos do sistema.

4.3.1 Sistema de Eixos Cartesiano

Um dos objectivos deste trabalho consistia na construção de um sistema de eixos para realizar o movimento de translação em três dimensões (X, Y, Z). Este sistema tri-axial pretende-se inovador relativamente às montagens convencionais dos sistemas de electrofiação compostas maioritariamente por posicionamentos estáticos das agulhas.

A estrutura mecânica possui a função de suporte e movimento do alvo segundo os três eixos e, consequentemente, a definição da distância do alvo à ponta da agulha. Para cumprir estes requisitos, várias disposições foram estudadas de forma a reduzir os custos e simplificar a complexidade da montagem. A selecção das calhas para os eixos X e Y recaíram no sistema de guias lineares *Drylin W* da marca *Igus* que podem ser observados na Figura 4.4. O comprimento das guias utilizadas é de 60 centímetros.

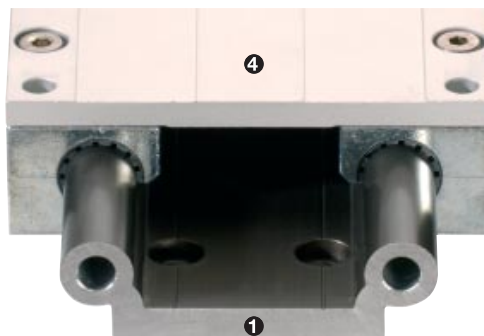


Figura 4.4 – Imagem do tipo de guias lineares utilizadas para montagem do protótipo (*Drylin W* – *Igus*).

Para o eixo X foram utilizadas duas guias paralelas metálicas nas quais foi acoplada uma terceira guia perpendicular responsável pela deslocação do eixo Y. Ou seja, o eixo Y encontra-se fixo nos rolamentos das guias do eixo X. O sistema pode ser observado na Figura 4.5.

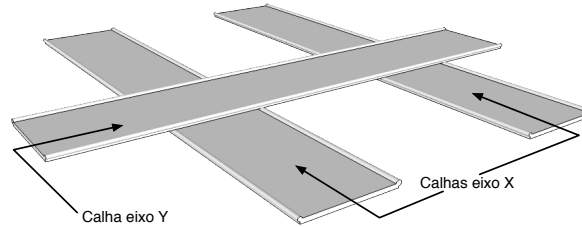


Figura 4.5 – Disposição das guias lineares dos eixos X e Y.

Em cima do perfil Y foi montado um dispositivo de parafuso linear também da marca *Igus* denominado *Drylin SLW* de 250 mm que pode ser observado na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Imagem da guia linear Drylin SLW – Igus utilizada para o eixo vertical da montagem.

A estrutura básica de eixos utilizada após montagem tem o aspecto da figura. A deslocação do *Drylin SLW* é solidária com o perfil Y em relação ao perfil X. Os três eixos são movimentados utilizando motores de passo cujo posicionamento pode ser observado também na Figura 4.7.

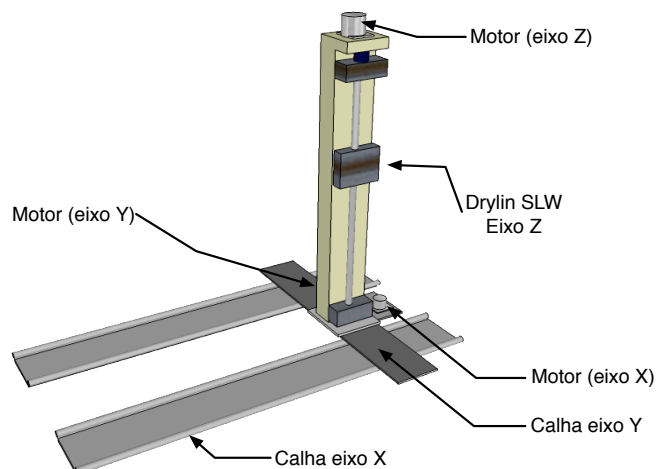


Figura 4.7 – Modelo da disposição dos materiais utilizados para formar o sistema de posicionamento de três eixos ortonormados.

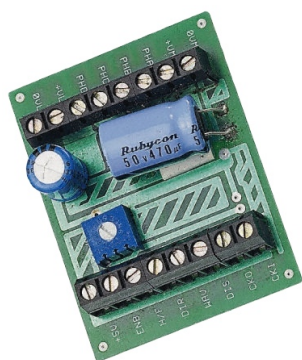
4.3.2 Motores Passo-a-passo

Para o movimento do sistema de eixos cartesianos foram seleccionados três motores de passo, Figura 4.8, do fabricante RS. Trata-se de motores bipolares híbridos que, em relação aos motores de tipo unipolar, oferecem maior binário e tensão de alimentação menor para o mesmo binário. Os motores utilizados caracterizam-se ainda pelo ângulo de passo de $1,8^\circ$, 200 passos por rotação e alimentação de 12V. A corrente necessária para accionar cada motor é de 1A.

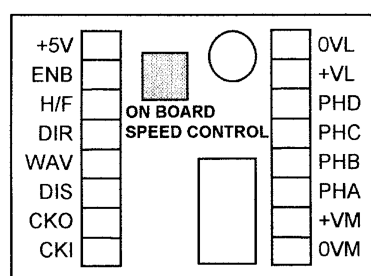


Figura 4.8 – Motor passo-a-passo da marca RS utilizado no protótipo.

Para accionar os motores de acordo com as especificações do fabricante foram adquiridas controladoras de motor. Na Figura 4.9(a) podem ser observadas as controladoras utilizadas enquanto que na Figura 4.9(b) pode ser observado o esquema de ligações da controladora.



(a)



(b)

Figura 4.9 – (a) Controladora de motores de passo; (b) Esquema de portas disponíveis na controladora.

A controladora é responsável por accionar por ordem as fases necessárias para fazer rodar o motor. A controladora recebe como sinais de entrada um sinal pulsado que simboliza a velocidade de rotação e um sinal de direcção para saber o sentido rotação que o utilizador pretende. Um esquema das ligações necessárias entre o motor e a controladora pode ser

observado na Figura 4.10. Para limitar a corrente do motor foram adicionadas resistências para adaptar a impedância do motor à controladora do motor passo-a-passo.

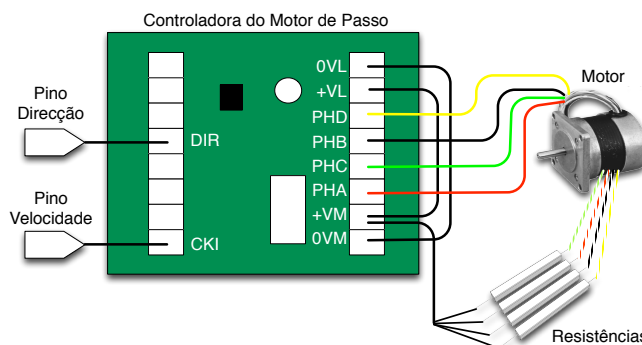


Figura 4.10 – Esquema de ligações entre o motor de passo e a controladora.

Os motores de passo são caracterizados por possuírem corrente nominal mesmo quando estão parados pois o binário de retenção exige circulação de corrente, o que provoca aquecimento do motor. Dado que a produção de fibras por electrofiação tem que ser executada, por vezes, durante várias horas, é necessário impedir que os motores sejam alimentados quando não é necessário que eles se movimentem. Dessa forma, projectou-se um circuito com um relé para alimentar os motores com a corrente necessária, sendo o relé desligado quando não é preciso fornecer energia aos motores de passo. O circuito projectado pode ser observado na Figura 4.11.

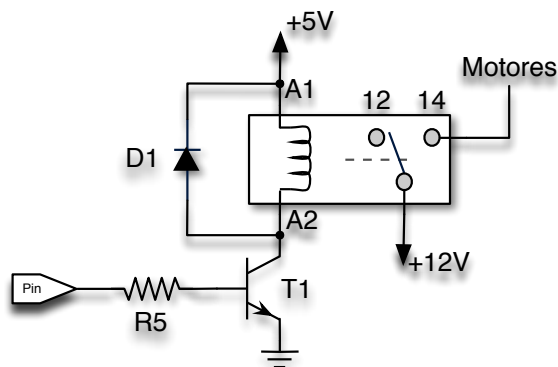


Figura 4.11 – Circuito do relé para alimentação dos motores de passo ($R5 = 10\text{ k}\Omega$).

O relé é alimentado com 5V e é accionado pelo pino do microcontrolador Arduino. Devido à baixa corrente que o Arduino fornece e que não é suficiente para fazer despoletar o relé é necessário utilizar um transístor para aumentar a corrente e assim, ser possível controlar o fornecimento de energia aos motores de passo.

4.3.3 Motor de Rotação

Para poder utilizar colectores rotativos optou-se pela aquisição de um motor de corrente contínua sem escovas com *encoder* integrado. O modelo adquirido foi o *BLDC 58 Brushless Motor*

da *Mclennan* (ver Figura 4.12). O BLDC 58 é um motor sem escovas de velocidade variável alimentado por 24Vdc. Este motor possui electrónica integrada que permite fornecer uma potência de saída de 50 Watt contínuos. Para seleccionar a velocidade do motor é necessário fornecer um sinal de controlo analógico entre 0 e 4V que permite obter uma velocidade entre as 100 e as 3600 rotações por minuto.



Figura 4.12 – Motor BLDC 58 da marca Mclennan.

O motor possui ainda retorno da velocidade do motor que pode ser visualizada pelo utilizador de forma a que se saiba a verdadeira velocidade do motor.

Na Figura 4.13 pode observar-se as cinco ligações que são necessárias para o correcto funcionamento do motor.

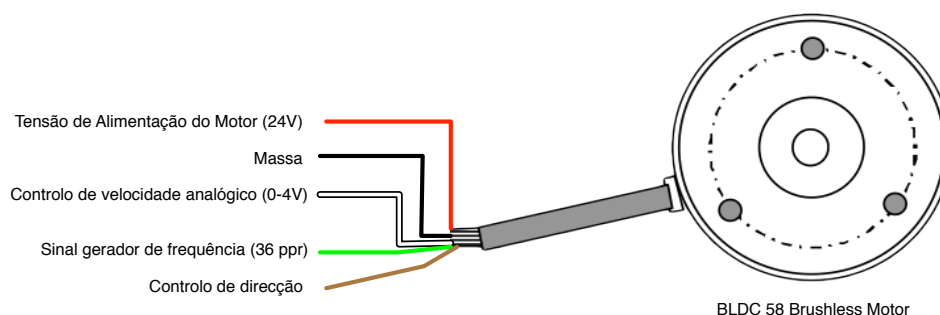


Figura 4.13 – Terminais de ligação e alimentação do motor BLDC 58.

O microcontrolador Arduino utilizado permite o output analógico de sinais entre o 0 e os 5V. No entanto, este tipo de sinal analógico é construído utilizando sinais digitais PWM que são caracterizados por possuírem um ligeiro ruído no sinal de saída. De forma a contornar esse problema, foi implementado um filtro RC à saída do microcontrolador para atenuar o ruído. Na Figura 4.14 pode observar-se o filtro utilizado.

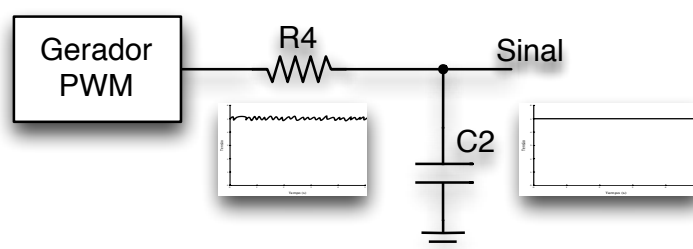


Figura 4.14 – Filtro RC para atenuar o ruído à saída do sinal PWM ($R4 = 1k\Omega$; $C2 = 200\mu F$).

A montagem do motor de rotação foi feita solidária com o eixo vertical do protótipo. O motor foi montado de tal forma que é possível modificar a sua posição manualmente para permitir o posicionamento paralelo ou perpendicular com o eixo da agulha. Esta opção foi tomada para permitir a utilização de diferentes colectores por forma a que pudessem ser depositadas fibras de formas diferentes. Por exemplo, com o motor na posição (a) da Figura 4.15 é possível fazer deposição em alvos planos com ou sem rotação enquanto que se o motor estiver na posição (b) da Figura 4.15 é possível adaptar cilindros rotativos de forma a depositar fibras alinhadas, por exemplo.

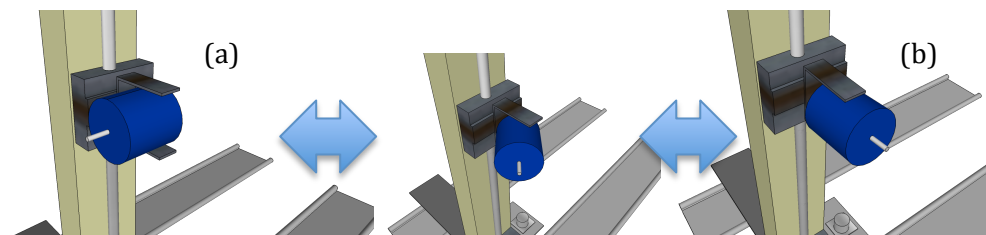


Figura 4.15 – Pormenor do motor BLDC com a sua possibilidade de rotação manual de 90 graus.

4.3.4 Circuito de Sensores

O correcto funcionamento de qualquer tipo de maquinaria produzida depende de sensores, os quais permitem obter informação sobre o estado do sistema de forma a que o controlador (automático ou manual) possa reagir de forma adequada, tomando a acção necessária. Neste protótipo são instalados sensores de posição limite para que a máquina saiba qual a posição tridimensional do alvo. Para tal, foram utilizados sensores ópticos cujo circuito elaborado para a aquisição do sinal lógico do sensor pode ser observado na Figura 4.16.

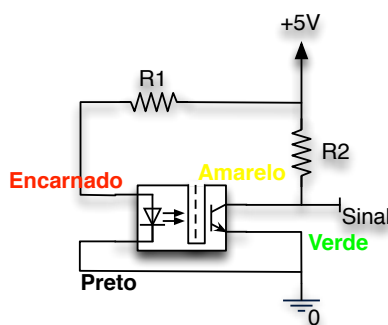


Figura 4.16 – Circuito do sensor óptico ($R1 = 320 \Omega$; $R2 = 3,2 k\Omega$).

Devido às características do microcontrolador e tendo em conta a necessidade de utilizar grande parte da sua capacidade de processamento para o accionamento dos motores de passo foi necessário utilizar serviços de interrupção para ligar os sensores. Devido às limitações no número de serviços de interrupção disponíveis (4) foi necessário usar alguma lógica programável para ligar estes dispositivos. Também devido às características de qualquer

dispositivo mecânico foi necessário adicionar um sistema de *debounce* aos sensores de forma a reduzir as variações do sinal lógico nos sensores. O circuito de *debounce* utilizado para cada sensor pode ser observado na Figura 4.17.

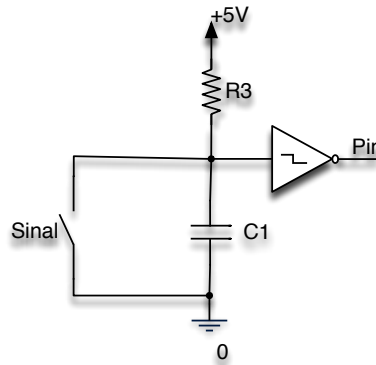


Figura 4.17 – Circuito de debounce de cada sensor óptico ($R3 = 10\text{ k}\Omega$; $C1 = 10\mu\text{F}$).

O circuito consiste num circuito RC que é depois filtrado por um inversor do tipo *Schmitt-Trigger* que estabiliza o sinal lógico. Por fim, a ligação aos portos de interrupção é feita utilizando a aquisição dos sensores juntos em pares (2 sensores por cada eixo). Para isso, foi utilizada uma porta lógica do tipo NAND cuja tabela de verdade pode ser consultada na tabela 4.1.

X	Y	Saída
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tabela 4.1 – Tabela de verdade da porta lógica NAND.

A utilização de uma porta lógica NAND em substituição de uma porta lógica OR é justificada pelo facto de os sensores de posição serem activados quando o seu valor lógico é zero.

4.3.5 Fontes de Alimentação

O fornecimento de energia para alimentar todos os circuitos é essencial tendo de cumprir diversos requisitos impostos pelos dispositivos utilizados. No protótipo desenvolvido foi necessário utilizar fontes de alimentação que fornecessem tensões de 5V, 12V e 24V. A fonte de tensão de 5V é necessária para alimentar os circuitos do relé, dos sensores ópticos e das portas lógicas. A fonte de tensão de 12V é necessária para fornecer energia à placa Arduino e aos motores de passo, que devido à corrente nominal de 1A que cada motor consome, precisa de um total de, no mínimo, 3A de corrente. A fonte de tensão de 24V é necessária para fornecer energia ao motor BLDC. A corrente mínima que a fonte tem que fornecer é de 2A (especificação do

fabricante). Foram adquiridas fontes da marca *Traco Power* (ver Figura 4.18): uma fonte com a referência TXL 100-12S que é caracterizada por debitar uma potência máxima de 100 Watt e fornece uma tensão contínua de 12V e uma corrente máxima de 8,5A; a segunda fonte adquirida foi o modelo TXL 100-24S que debita uma potência máxima de 100 Watt e fornece uma tensão contínua de 24V e uma corrente máxima de 4,5A. Ambas as fontes cumprem as especificações ao nível de potência e correntes necessárias. A alimentação de 5V é obtida através do microcontrolador Arduino que fornece a energia suficiente para alimentar os dispositivos mencionados que requerem 5V.



Figura 4.18 – Imagem de uma das fontes de alimentação utilizadas na montagem.

4.4 Protótipo Implementado

Todos os componentes mencionados nas secções anteriores foram montados e dispostos na bancada da forma demonstrada na Figura 4.19.

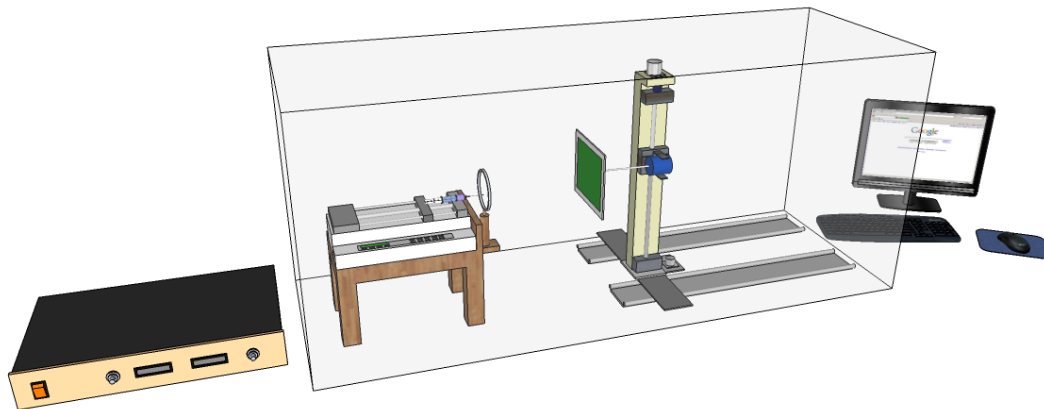


Figura 4.19 – Disposição dos diversos componentes do sistema na bancada de laboratório.

A automatização do movimento do alvo pode seguir as orientações apresentadas na Figura 4.20.

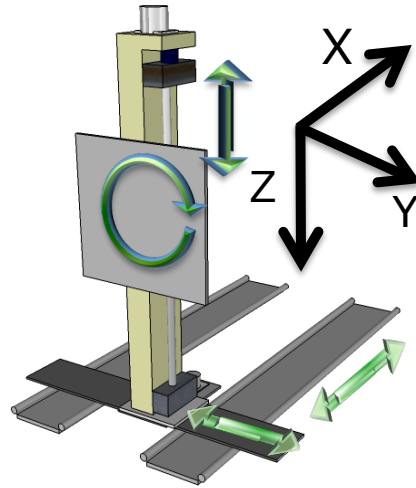


Figura 4.20 – Graus de liberdade de movimento do protótipo desenvolvido.

Após a montagem dos componentes, foi fotografada a disposição dos diversos componentes no laboratório. As figuras seguintes são o resultado dessa disposição.

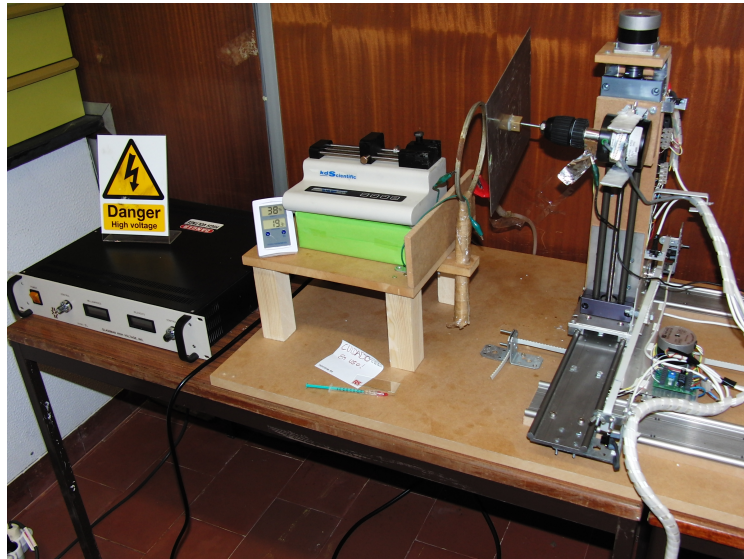


Figura 4.21 – Componentes instalados na bancada do laboratório.

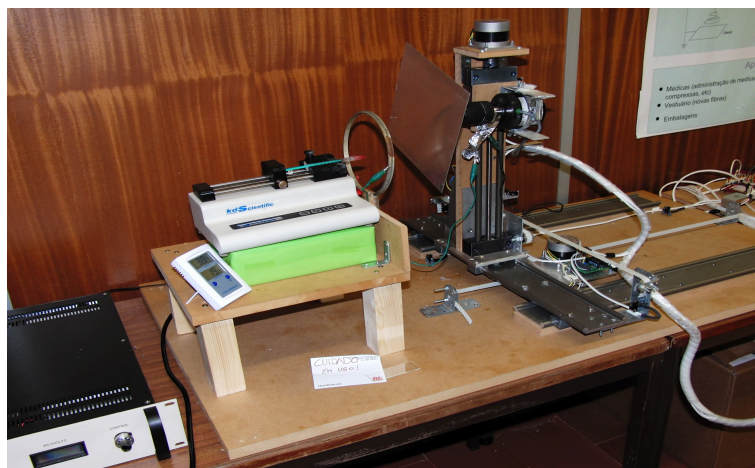


Figura 4.22 – Componentes instalados na bancada do laboratório.

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram diversos pormenores da montagem efectuada.

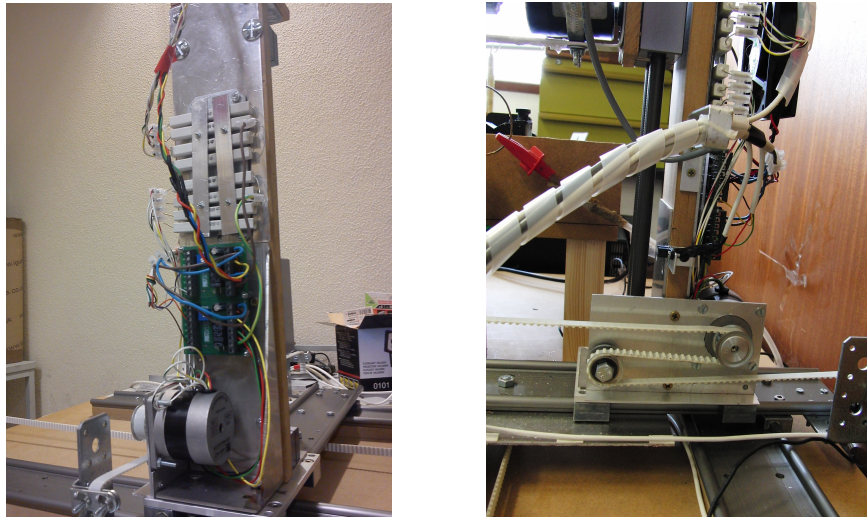


Figura 4.23 – Pormenor da instalação dos motores e das correias que fazem movimentar os eixos.

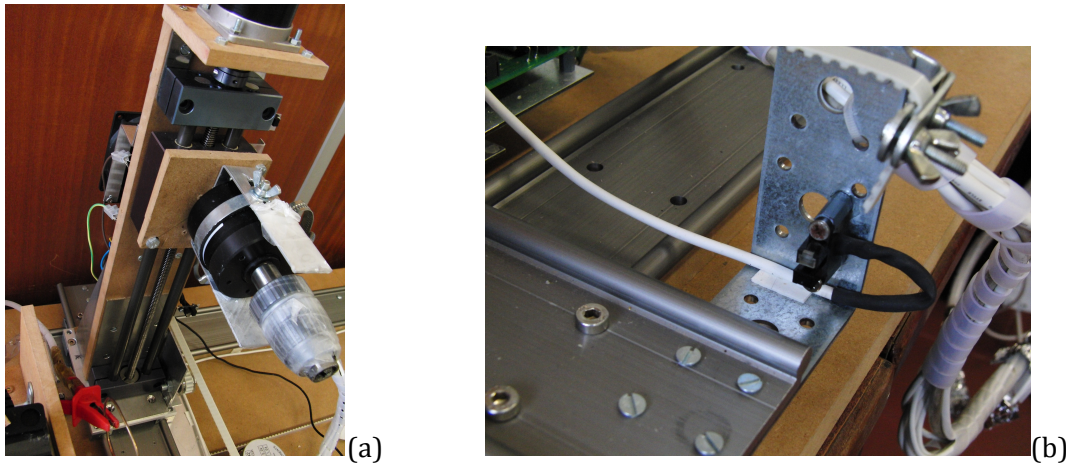


Figura 4.24 – Pormenor da instalação do motor de rotação no eixo vertical (a); Pormenor da instalação do sensor óptico(b).

4.5 Circuito Integrado com o Microcontrolador

Existe um microcontrolador da Arduino que é responsável por controlar todo o *hardware* do sistema de electrofiação. Para unificar todos os circuitos e as ligações ao microcontrolador foi desenvolvida uma placa de circuitos que une todos os componentes. Na Figura 4.25 pode ser observado o diagrama da implementação efectuada.

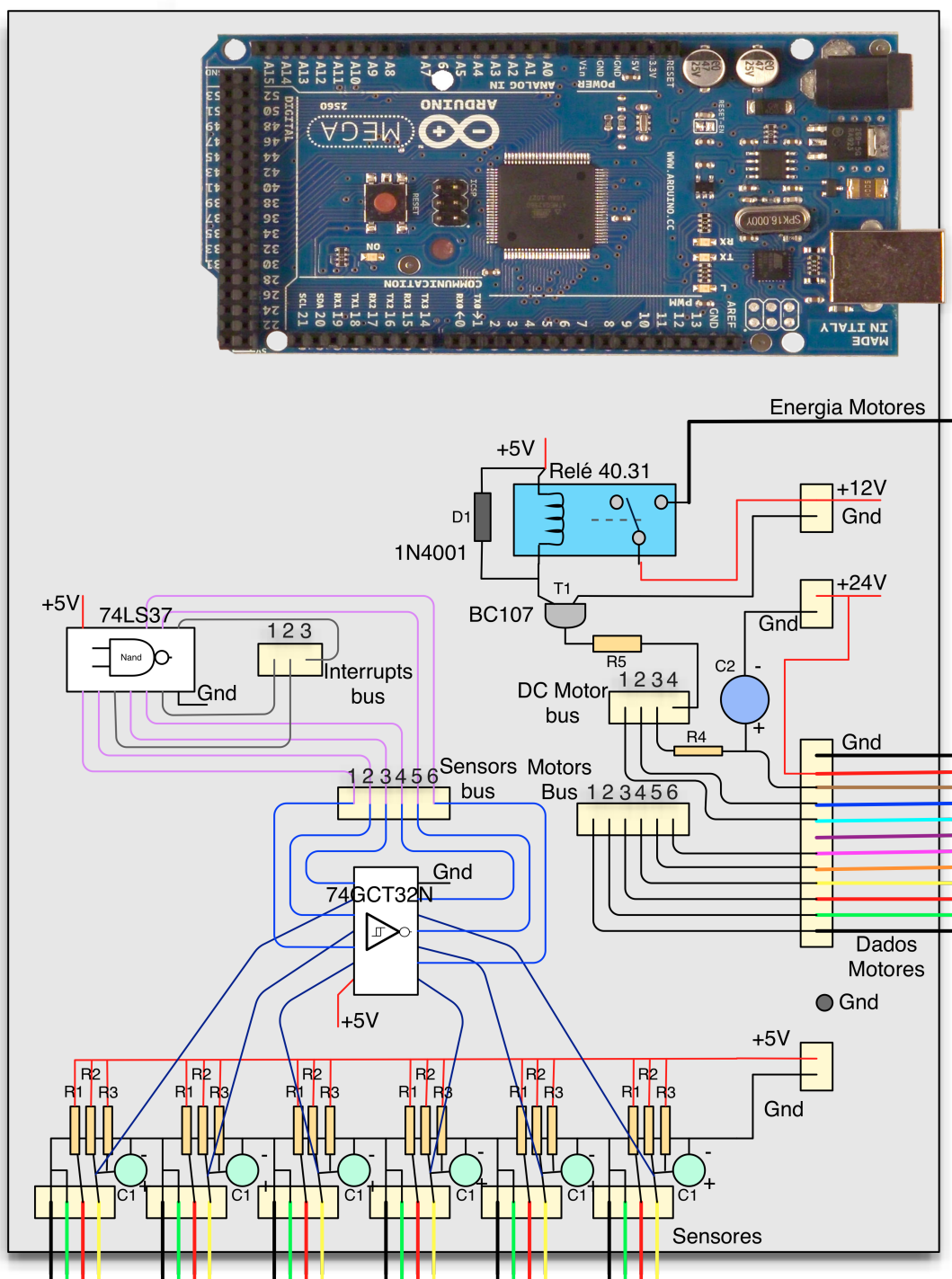


Figura 4.25 – Diagrama da placa de circuitos.

A correspondência entre os pinos do microcontrolador e os dispositivos de *hardware* pode ser consultada na Tabela 4.2 onde é feita uma breve descrição da função de cada pino.

Nº do Pino	Descrição	Input/Output
2	Velocidade Motor eixo X	Output
3	Direcção Motor eixo X	Output
4	Velocidade Motor eixo Y	Output
5	Direcção Motor eixo Y	Output
6	Velocidade Motor eixo Z	Output
7	Direcção Motor eixo Z	Output
8	Velocidade Motor DC	Output
9	Direcção Motor DC	Output
18	Interrupt Sensores eixo X	Input
19	Interrupt Sensores eixo Y	Input
20	Interrupt Sensores eixo Z	Input
23	Sensor Xmin	Input
25	Sensor Xmax	Input
27	Sensor Ymin	Input
29	Sensor Ymax	Input
31	Sensor Zmin	Input
33	Sensor Zmax	Input
35	Pin Relé de Energia Motores de Passo	Output

Tabela 4.2 – Tabela de ligações dos dispositivos físicos com os portos do microcontrolador.

No diagrama da figura 4.26 pode ser observada a ligação entre os pinos e o circuito integrado projectado. Existem quatro interfaces de ligação com o circuito integrado:

- Sensors Bus – Bus de ligação com os sensores ópticos;
- Interrupts Bus – Bus de ligação com os serviços de interrupção associados aos sensores ópticos;
- Motors Bus – Bus de ligação com os motores de passo que fornece sinais de velocidade e direcção aos motores de passo.
- DC Motor Bus – Bus de ligação com o Motor BLDC, que fornece o sinal de direcção e o sinal analógico de velocidade e recebe o sinal de retorno da velocidade do motor. O accionamento do relé de energia também está associado a este bus.

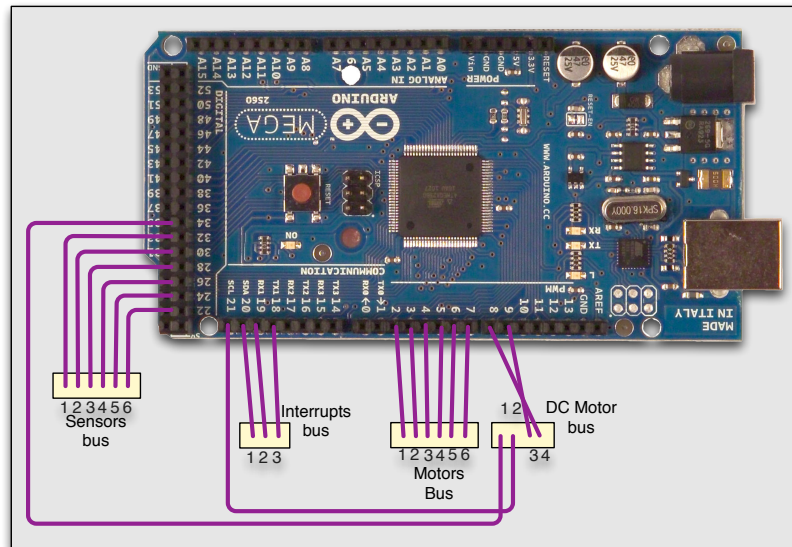


Figura 4.26 – Correspondência entre os pinos do microcontrolador Arduino e os buses de ligação da placa de circuitos.

Por fim, na Figura 4.27 pode ser observada a implementação prática da placa de circuitos com todas as ligações anteriormente referidas.

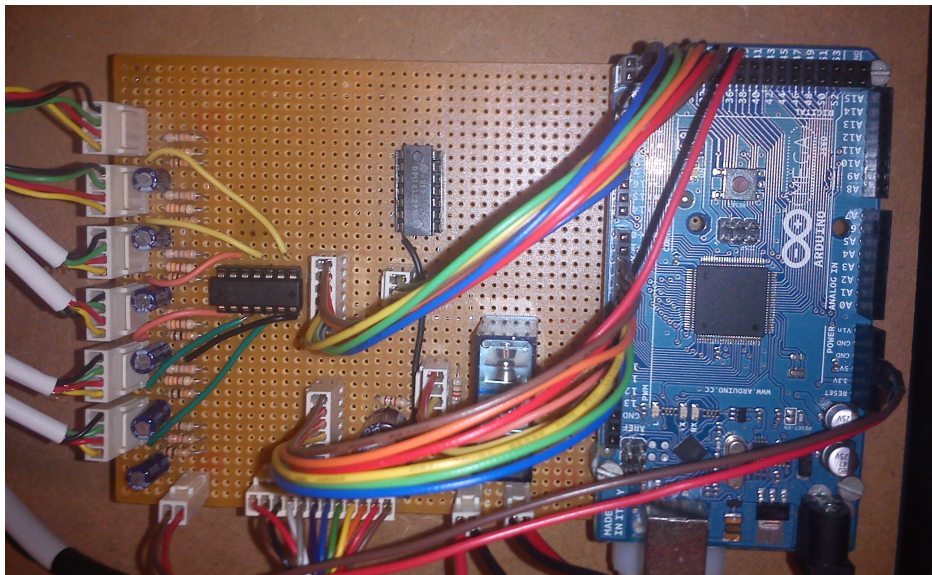


Figura 4.27 – Circuitos desenvolvidos com integração do microcontrolador Arduino.

4.6 Programação do Microcontrolador Arduino

O microcontrolador Arduino tem a função de controlar todos os dispositivos de *hardware* instalados assim como estabelecer a ponte de comunicação entre a interface do utilizador e os dispositivos de hardware. Na Figura 4.28 pode ser observado o diagrama geral de funcionamento do microcontrolador. O programa é, então, responsável por monitorizar os

sensores, controlar os motores de passo e o motor BLDC e comunicar com a interface no computador utilizando o protocolo série através de uma porta USB.

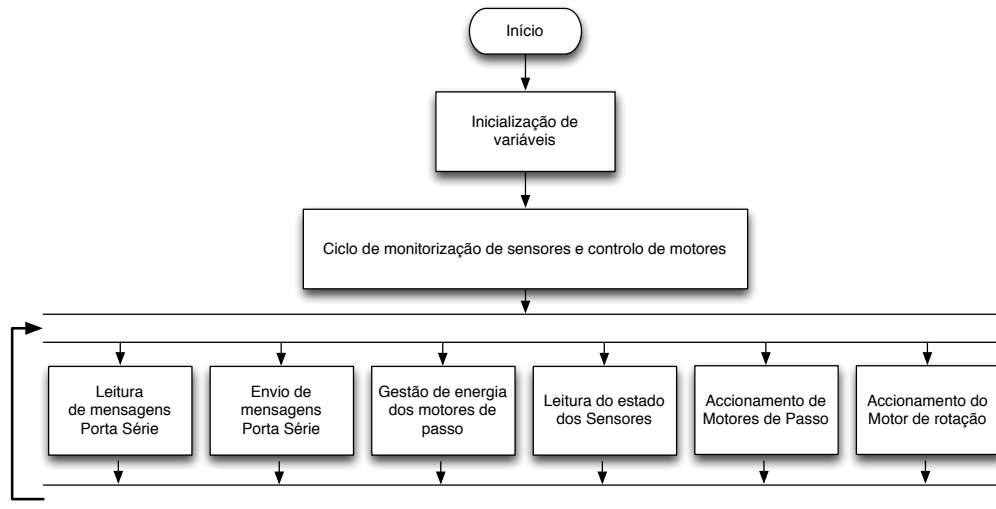


Figura 4.28 – Diagrama geral de funcionamento do microcontrolador Arduino.

Quando o microcontrolador é ligado é feita a configuração dos portos utilizados para ligação aos dispositivos de *hardware* já referidos na secção anterior. São avaliados os estados dos sensores de posição e é feita a ligação através da porta série (USB) ficando o sistema disponível para comunicar com a aplicação do PC.

Para accionar os motores de passo, o microcontrolador utiliza uma biblioteca denominada *AccelStepper*[77] que permite fazer a sua gestão e o accionamento utilizando uma partilha da capacidade de processamento do microcontrolador. Isto significa que quando estão a ser accionados os motores é permitido ao microcontrolador continuar a ser utilizado para outros processamentos, nomeadamente receber mensagens pela porta série e avaliar os sensores. Esta biblioteca tem um papel importante pois o processamento do microcontrolador é sequencial o que significaria que, caso a biblioteca não fosse utilizada, quando fosse necessário accionar um motor, o microcontrolador ficaria impedido de processar mais informação e não seria possível, por exemplo, ler o valor lógico dos sensores ópticos. Outra vantagem da utilização desta biblioteca é a possibilidade de accionar vários motores, independentemente uns dos outros com velocidades e acelerações distintas. A biblioteca fornece também funções de aceleração e desaceleração dos motores de passo.

Quando a aplicação do PC se liga ao microcontrolador é avaliado o estado da máquina, ou seja, a posição em (X, Y, Z) do alvo. Caso o microcontrolador não tenha informação sobre essa posição é feito o RESET da posição do alvo. O diagrama de funcionamento desse reinício pode ser observado na Figura 4.29.

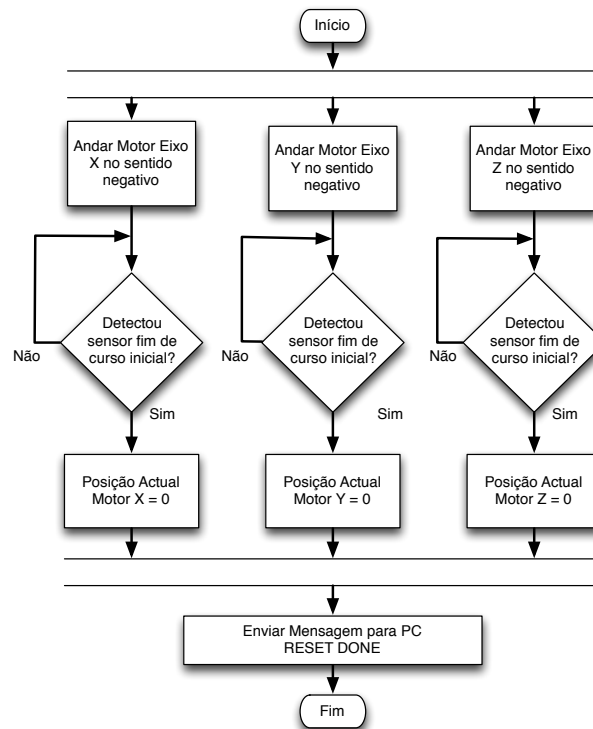


Figura 4.29 – Diagrama de funcionamento da função de RESET.

A função bloqueia o funcionamento do programa e faz movimentar os motores para a origem dos eixos ordenados. Assim que os três motores estejam na posição desejada são configuradas essas coordenadas como (0, 0, 0) e todos os movimentos posteriores são realizados em função deste referencial, sabendo-se assim, a posição dos motores em qualquer instante.

O microcontrolador oferece ainda a funcionalidade de calibração dos motores para que haja uma correspondência realista entre os passos que os motores dão e a distância real percorrida. O diagrama de funcionamento é mostrado na Figura 4.30.

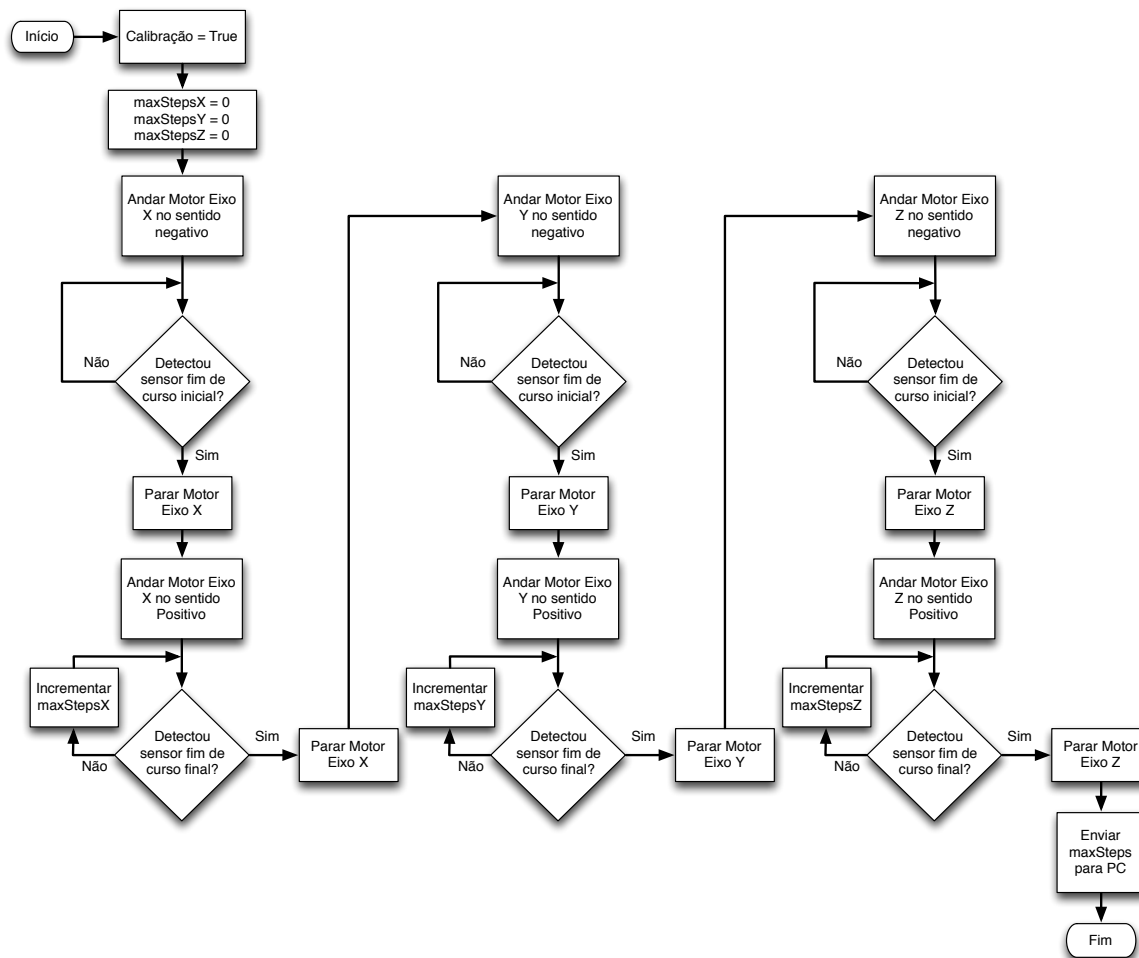


Figura 4.30 – Diagrama de funcionamento da função de calibração do microcontrolador.

Esta função também bloqueia o funcionamento do programa. Para cada eixo da máquina, a função faz o motor andar no sentido da origem do referencial e, após atingir o sensor, movimenta-se em sentido contrário até ao sensor de posição final. Nesse movimento, a função contabiliza o número de passos necessários para percorrer a distância entre os dois sensores que é fixa, ficando assim calibrado o eixo. Por fim, o microcontrolador envia o número de passos para a aplicação no computador que é responsável por fazer a gestão da correspondência entre passos e a distância percorrida.

4.6.1 Comunicação Arduino – Interface PC

O microcontrolador Arduino, quando necessita de comunicar com dispositivos, utiliza a interface série RS-232. Essa interface é caracterizada por ser uma forma de comunicação baseada em duas linhas de transmissão (uma de envio e outra de recepção de dados) em que os dados são transaccionados na forma de bytes, normalmente, em formato ASCII. No caso da placa Arduino utilizada, a comunicação é feita com o protocolo série mas utilizando a porta USB

disponível na placa. O Arduino possui um interface USB – Série intrínseco e por isso se utiliza genericamente, nesta dissertação, a expressão comunicação série em vez de USB. O Arduino é ainda uma placa que funciona como SLAVE na comunicação, estando sempre “à escuta” de uma ligação de outro dispositivo que funcionará como MASTER. É o que acontece neste trabalho. A aplicação no PC funciona como MASTER e o microcontrolador escuta permanentemente a porta de comunicação série à espera de dados. Desta forma, apenas quando a aplicação no PC inicia uma ligação com o microcontrolador existe troca de mensagens entre os dois dispositivos. O formato de mensagens utilizado é composto por um carácter de início de mensagem (“<”) e por um carácter de fim de mensagem (“>”). Estes caracteres são utilizados para certificar o reconhecimento da mensagem recebida como uma mensagem válida. O diagrama de funcionamento da função de leitura de caracteres pode ser observado na Figura 4.31.

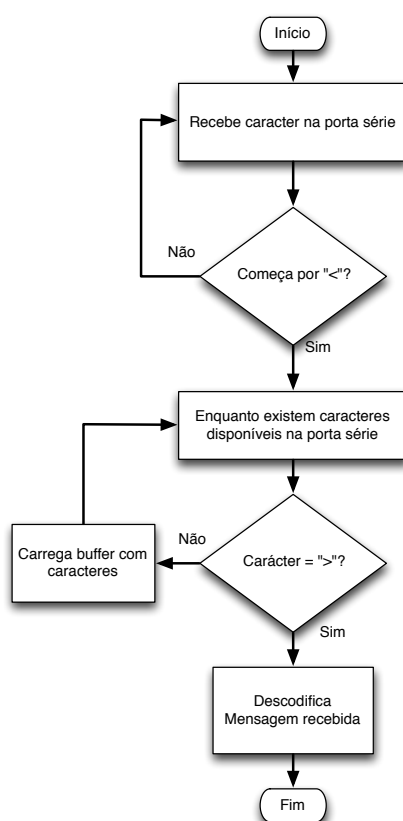


Figura 4.31 – Diagrama de funcionamento da leitura de mensagens realizado pela porta série do microcontrolador.

A mensagem deverá ser constituída por um conjunto de valores numéricos separados pelo carácter “;”. O formato da mensagem é portanto da seguinte forma:

<ACÇÃO;COMANDO;VAL 1;VAL 2;VAL 3;.....; VAL N>

O primeiro valor numérico “ACÇÃO” corresponde ao tipo de mensagem que será recebida e que irá definir a forma como os restantes valores lidos serão executados. Este processo de descodificação da mensagem recebida por ser observado no diagrama de

funcionamento presente na Figura 4.32 onde são associadas as diversas acções às funções que deve desencadear.

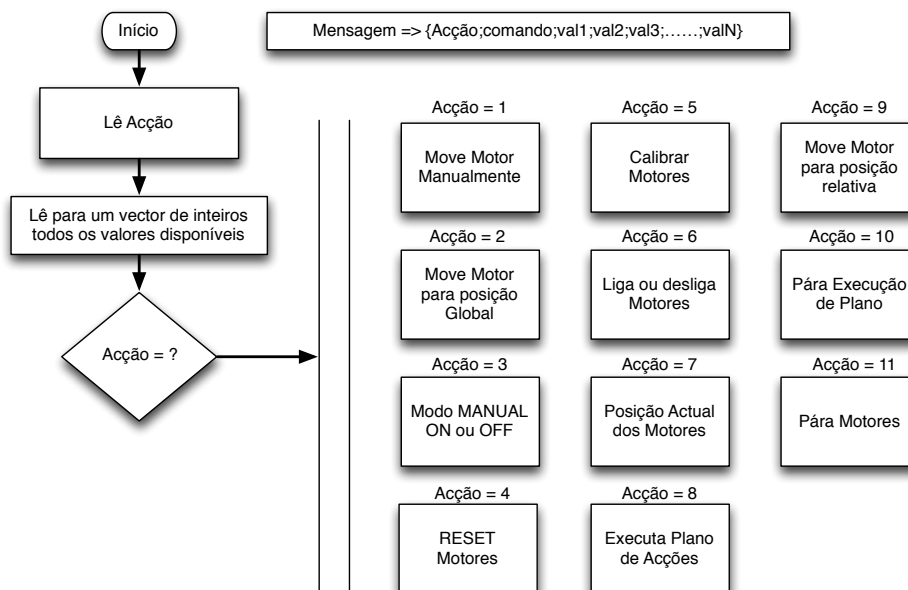


Figura 4.32 – Diagrama de funcionamento da função de decodificação de mensagens obtidas pela porta série.

O programa irá executar as acções de acordo com a mensagem trocada com a aplicação do PC desde o accionamento dos motores, a calibração dos motores ou a execução de sequências de comandos (Execução de Planos, secção seguinte).

Conforme as acções pedidas pela aplicação do PC o microcontrolador executará as funções respectivas e responderá à aplicação utilizando uma mensagem de resposta que funciona no mesmo formato que as mensagens de recepção. A interface do PC utilizará um diagrama semelhante ao descrito antes para ler as mensagens enviadas pelo microcontrolador.

O código-fonte do microcontrolador pode ser observado em anexo.

4.7 Interface Gráfica

Além de se ter implementado a parte mecânica do sistema, foi necessário desenvolver um ambiente gráfico para facilitar a interacção do protótipo com o utilizador. Para a implementação do ambiente gráfico, foi desenvolvida uma aplicação em ambiente Windows programada em C# utilizando a ferramenta de desenvolvimento Microsoft Visual Studio 2008 (ver Figura 4.33).

A interface desenvolvida dispõe-se em três separadores principais designados “Manual”, “Global & Saved Positions” e “Plan Execution”. Quando é executada a aplicação é aberto um separador que indica a necessidade de se conectar ao microcontrolador Arduino que irá fazer a

ligação à máquina. Para realizar essa ligação é utilizado a GroupBox “*Serial communication settings*” escolhendo a porta COM respectiva e a velocidade de ligação, neste caso, uma *Baud Rate* de 9600 bps. Depois de feita a ligação com sucesso são disponibilizados os separadores referidos que permitem a orientação e controlo dos motores da máquina.

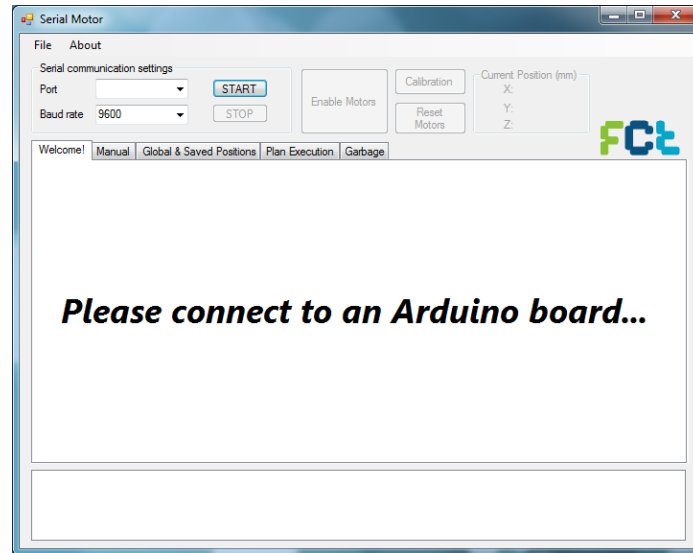


Figura 4.33 – Interface inicial da aplicação desenvolvida em C#.

A interface possui ainda uma Caixa de Mensagens na parte inferior onde são afixadas as mensagens trocadas entre a interface e o Arduino assim como algumas outras informações.

Após feita a ligação com sucesso, os restantes separadores ficam disponíveis. No primeiro separador (“*Manual*”) é possível controlar todos os motores do protótipo manualmente. A interface pode ser observada na Figura 4.34.

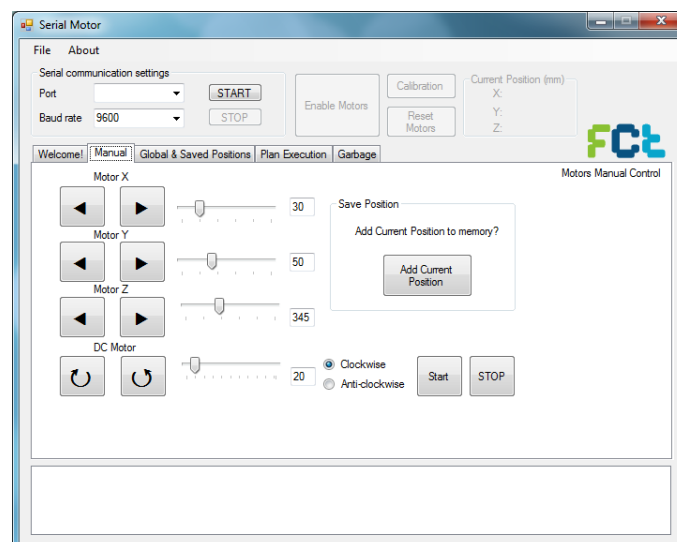


Figura 4.34 – Interface de controlo manual dos motores da montagem.

Neste separador é oferecida a possibilidade de movimentar qualquer motor da máquina permitindo a definição da sua velocidade em passos por segundo. Em relação ao motor de

corrente contínua é possível accioná-lo em ambos os sentidos e deixá-lo a funcionar durante tempo indeterminado.

Neste separador é ainda oferecida a funcionalidade de permitir registo da posição actual do alvo. Esta funcionalidade traz a vantagem de poder, posteriormente, voltar a esta posição sem ser necessário posicionar a máquina manualmente.

O separador “Global & Saved Positions” (ver Figura 4.35) permite controlar o posicionamento global ou relativo do alvo sendo necessário fornecer três parâmetros para cada eixo da máquina que são accionados, cada um, por um motor.

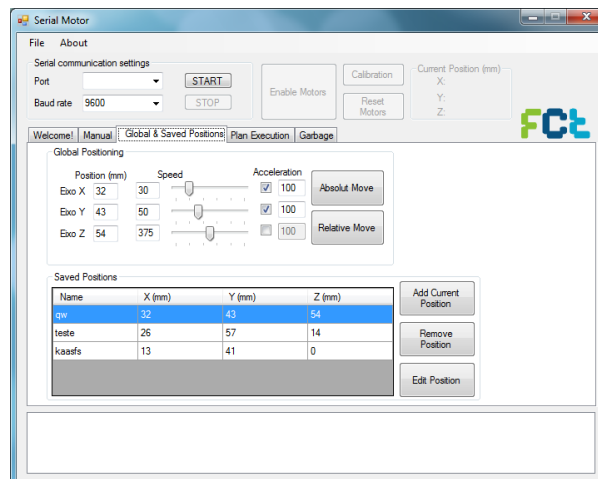


Figura 4.35 – Interface de controlo do posicionamento global do alvo e caixa de controlo das posições globais guardadas.

Na caixa “Global Positioning” podem ser observados os parâmetros que são necessários fornecer sobre os três motores de posição.

Para cada eixo é necessário fornecer a posição que se pretende para o motor (em milímetros), a sua velocidade (em passos por segundo) e a sua aceleração (em passos/s^2).

É possível realizar dois tipos de movimentos com os motores:

- Um posicionamento global, que é feito em relação à origem do referencial (x, y, z). A movimentação do alvo pressupõe o fornecimento de coordenadas positivas em (x, y, z) entre 0 e o valor máximo de cada eixo (unidades de milímetros).
- Um posicionamento relativo, que é realizado em relação à posição onde o alvo se encontra na altura do movimento. Neste caso, para realizar movimentação no sentido positivo dos eixos fornecem-se valores de posição positivos e caso se pretenda mover os motores em sentido contrário fornecem-se valores de posição negativos.

Em qualquer dos casos é possível regular a velocidade e a aceleração dos motores.

O separador em questão permite ainda aceder às posições gravadas em memória. Como foi referido anteriormente, no separador Manual é possível guardar posições globais do alvo. Na caixa “Saved Positions” é fornecida a possibilidade de editar, guardar e adicionar novas posições. Esta funcionalidade traz a vantagem de memorizar posições características que diferentes

investigadores podem utilizar de forma a possibilitar repetir ensaios de electrofiação com alguma consistência no posicionamento do alvo. Por exemplo, um investigador num dia x, utiliza a posição (100, 130, 100) (mm) para produzir uma membrana de um composto cujas fibras foram produzidas com um diâmetro específico. Se utilizar a opção de guardar a posição, num outro dia pode voltar a fabricar o mesmo tipo de membrana na mesma posição, pois sabe que foi essa posição que utilizou. Usando esta funcionalidade podem modificar-se outros parâmetros da electrofiação sabendo que as características mecânicas do posicionamento do alvo não foram alteradas.

No separador “Plan Execution” (ver Figura 4.36) é possível construir e definir sequências de movimentos dos vários motores formando padrões com o alvo. Esta funcionalidade permite que o utilizador defina movimentos simples ou complexos utilizando funções predefinidas. Estas funções são:

- Movimento Absoluto para a posição (x, y, z).
- Movimento Relativo
- Repetir Movimento
- Pausa
- Motor de rotação

Os movimentos absolutos e relativos executam as mesmas funções já referidas anteriormente. A função de pausa permite que entre acções do plano exista uma paragem por um período definido pelo utilizador entre 0 e 120 segundos.

A função correspondente ao motor de rotação permite colocá-lo a rodar em ambos os sentidos e com velocidade definida pelo utilizador.

A função Repetir Movimento permite criar ciclos com as funções descritas anteriormente. É ainda possível definir o número de ciclos que se pretende que sejam executados assim como definir ciclos infinitos.

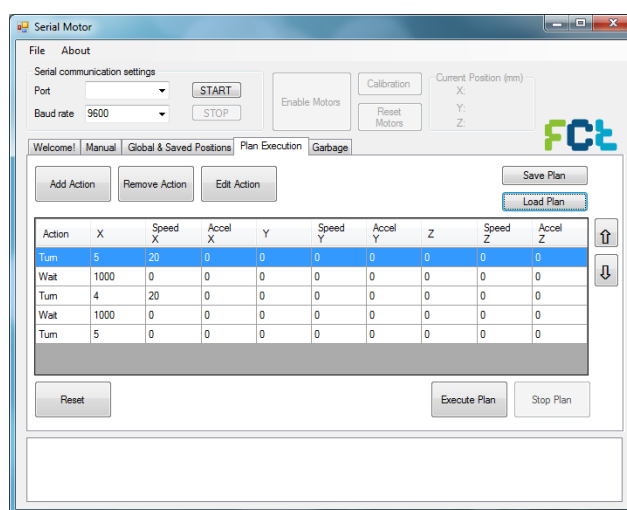
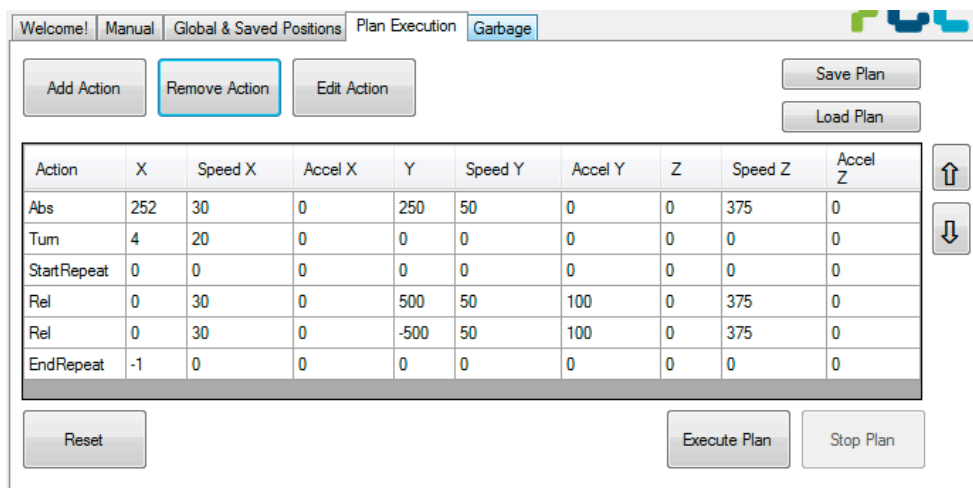


Figura 4.36 – Interface de controlo e execução de planos de acções.

Para poder explicar melhor esta funcionalidade irá dar-se um exemplo de um caso prático. Imagine-se que se pretende depositar fibras de um determinado composto e essa deposição terá que ser sobre um alvo que se encontra a 10cm da seringa. A especificação obriga que o alvo se desloque 20 cm perpendicularmente (eixo Y) em relação à ponta da seringa e ainda é necessário que o alvo se encontre a rodar com uma velocidade de 150rpm.

O plano necessário para executar estes movimentos pode ser observado na Figura 4.37.



Action	X	Speed X	Accel X	Y	Speed Y	Accel Y	Z	Speed Z	Accel Z
Abs	252	30	0	250	50	0	0	375	0
Turn	4	20	0	0	0	0	0	0	0
StartRepeat	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rel	0	30	0	500	50	100	0	375	0
Rel	0	30	0	-500	50	100	0	375	0
EndRepeat	-1	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.37 – Exemplo de plano de execução.

Para realizar estes movimentos seria necessário primeiro colocar o alvo à distância pretendida da seringa. Para isso utilizar-se-ia um comando de movimento absoluto para colocar o alvo a 10 cm da seringa e posicionar o eixo Y na posição 10 cm (presume-se que a agulha está na posição 20 cm em Y). De seguida, utiliza-se a função de rotação do motor para o pôr a rodar à velocidade pretendida. O passo seguinte seria criar um ciclo infinito (com a função de criar ciclos) que teria duas acções de movimentação relativa. Uma movimentação positiva em Y de 20cm e uma movimentação negativa também de 20cm. Estes passos seriam suficientes para criar a movimentação pretendida do alvo.

As funções criadas permitem criar movimentos bem mais complexos que envolvam vários ciclos e em que as movimentações não sejam com velocidades constantes por exemplo. Permitirá dessa forma gerar alguns padrões como ziguezagues ou formas geométricas, por exemplo.

Capítulo 5. Ensaios e Resultados

Este capítulo apresenta os primeiros ensaios e resultados obtidos do projecto implementado para electrofiação.

O protótipo desenvolvido para electrofiação destina-se a ser usado no processamento de polímeros no laboratório de Polímeros do Departamento de Ciência dos Materiais da FCT/UNL. Foram efectuados diversos ensaios e obtidas fibras poliméricas, no âmbito de projectos de investigação em curso dentro do grupo de Materiais Poliméricos e Mesomorfos do CENIMAT/I3N e DCM/FCT/UNL.

5.1.1 Fibras *Janus*

Na Figura 5.1 é apresentada uma membrana não-tecida obtida por electrofiação a partir de uma solução polimérica viscosa utilizando o sistema desenvolvido. Estas membranas foram preparadas a partir de redes poliméricas obtidas através de oligómeros baseados em óxido de polipropileno com três grupos isocianato terminais (PU, $f=3$) e em polibutadienodiol (PBDO, $f=2$). Estas soluções, produzidas a partir dos dois pré-polímeros PU e PBDO, têm a característica de variar a sua viscosidade com o tempo. O protótipo de electrofiação desenvolvido com este trabalho, permitiu o posicionamento do alvo sob o qual são depositadas as membranas não-tecidas de PU/PBDO, o que traz vantagens acrescidas ao processamento deste tipo de materiais.

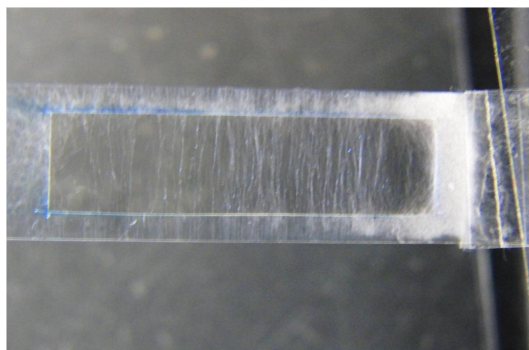


Figura 5.1 – Fotografia de uma membrana não-tecida obtida por electrofiação a partir de uma solução polimérica 60PU/40PBDO.

Após terem sido produzidas, as micro e nanofibras elastoméricas PU/PBDO foram sujeitas a um tratamento que consiste na exposição à radiação ultravioleta (UV) e ao seu inchamento em tolueno (através de uma extracção sol-gel). Este tratamento permite que a superfície que foi exposta à radiação UV se torne mais rígida que o restante material e se torne rugosa após o inchamento e a secagem. Desta forma é possível obter micro e nanofibras assimétricas com uma face lisa e outra rugosa. Na Figura 5.2 estão apresentadas duas imagens de microscopia electrónica de varrimento (SEM) das fibras elastoméricas “Janus” obtidas.

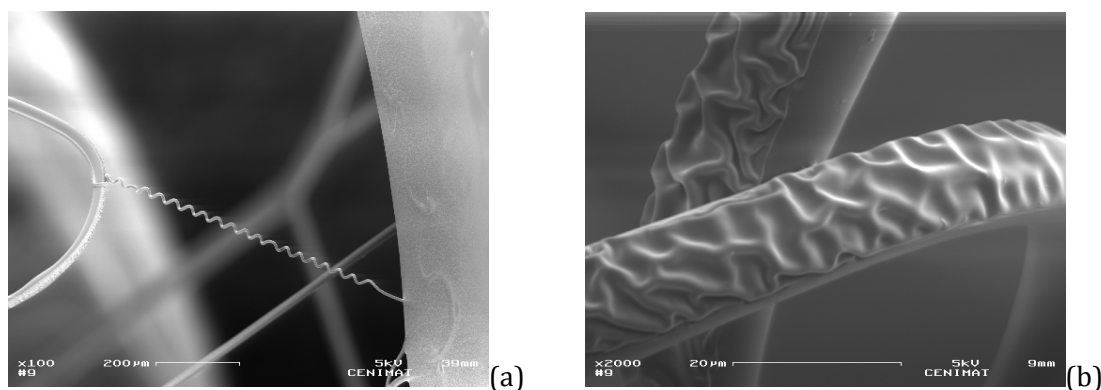


Figura 5.2 – Microfotografia de microfibras obtidas por electrofiação a partir de uma solução 60PU/40PBDO (% w/w) em tolueno, após exposição à radiação UV e extracção sol-gel em tolueno. (a) estrutura helicoidal presente e que se forma quando a fibra está presa nas duas extremidades e a tensão a que esteve sujeita é libertada; (b) pormenor da rugosidade presente numa fibra elastomérica “Janus”.

O baixo custo dos pré-polímeros utilizados e a sua facilidade de processamento, tornam os elastómeros PU/PBDO materiais com elevado potencial para o desenvolvimento de novos dispositivos a nível industrial. O estudo da aplicação deste tipo de materiais (micro e nanofibras) deve-se sobretudo à elevada área superficial, muito superior comparando com a área dos materiais de dimensões macroscópicas. Uma área onde a utilização de nanofibras pode ter um valor acrescentado é a medicina onde podem, por exemplo, ser utilizadas na regeneração de tecidos[78] ou na libertação controlada de fármacos[79]. Outras áreas onde a utilização de

nanofibras pode ser benéfica diz respeito à filtragem de ar[80], ao isolamento térmico[81] e ao vestuário de protecção[8].

5.1.2 Biobaterias

As biobaterias (ver Figura 5.3) são dispositivos electroquímicos desenvolvidos a partir de uma matriz de nanofibras produzida por electrofiação. As nanofibras de acetato de celulose formam uma estrutura ultraleve e flexível com uma elevada área superficial que funciona, simultaneamente, como suporte físico, separador e meio permeável a iões.

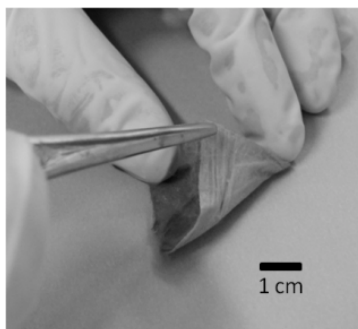


Figura 5.3 – Biobateria.

Os eléctrodos metálicos são, posteriormente, depositados por evaporação térmica revestindo as fibras à superfície da membrana, conferindo uma elevada área catalítica (ver Figura 5.4). Utilizando os fluidos biológicos como electrólito (o sangue, por exemplo), estas biobaterias visam a alimentação de dispositivos médicos implantáveis de baixo consumo[14].

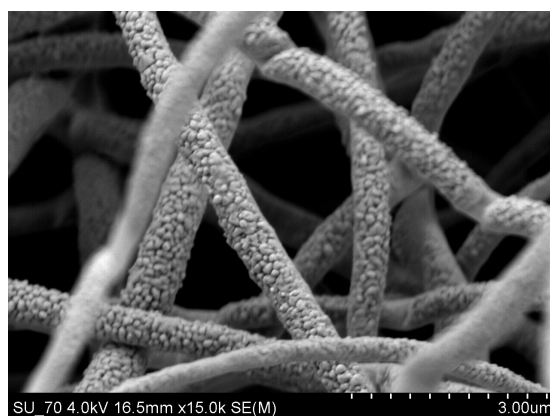


Figura 5.4 – Imagem de SEM das nanofibras de acetato de celulose revestidas com um metal.

Capítulo 6. Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo apresentam-se as conclusões sobre o trabalho efectuado nesta dissertação sendo também apresentadas algumas sugestões de trabalho futuro que permitirão melhorar alguns aspectos do projecto agora implementado.

6.1 Conclusões

O objectivo principal desta dissertação residiu na proposta de uma solução alternativa ao controlo do alvo onde são depositadas micro e nanofibras por electrofiação, recorrendo à implementação de um sistema de posicionamento tridimensional dotado de controlo através de uma aplicação gráfica presente num computador.

Esta solução foi proposta por apresentar diversos benefícios ao utilizador e ao desempenho da electrofiação. A possibilidade do posicionamento automático do alvo com distâncias pré-programadas, a possibilidade de repetição de ensaios, a interface de utilizador simples, a versatilidade de modificação dos alvos aplicados e a protecção do utilizador constituem os motivos fundamentais para desenvolvimento deste protótipo.

Em relação à electrofiação, que constitui o tema envolvente deste trabalho, é possível concluir, pela análise da literatura, que existe uma tendência crescente na utilização da técnica de produção de fibras e o interesse em desenvolver equipamentos de teste especializados devido às inúmeras potencialidades e aplicações das membranas produzidas.

O trabalho desenvolvido no âmbito da dissertação de mestrado consistiu essencialmente na implementação de uma mesa com o sistema de eixos (x, y, z) para posicionamento do alvo onde as fibras são depositadas, o accionamento dos motores de passo e do motor de corrente contínua, o sistema de sensores de posição, e o desenvolvimento de uma aplicação de controlo

dos diversos dispositivos que permite a interacção de um utilizador com o sistema de posicionamento.

Pelo trabalho desenvolvido, conclui-se que a implementação de um sistema automatizado para deposição de micro e nanofibras por electrofiação é possível apesar do número considerável de equipamentos que devem ser controlados pelo interface gráfico e pelo microcontrolador associado.

O microcontrolador Arduino revelou-se um sistema de desenvolvimento bastante completo. A sua mais-valia distinguiu-se pelos portos de ligação suficientes à interacção com todos os dispositivos e pelas funcionalidades de que dispõe que permite facilitar o desenvolvimento, nomeadamente as bibliotecas de accionamento de vários motores de passo em simultâneo, conversão e geração de sinais analógicos e funções de comunicação através da porta série/USB.

A estrutura composta pelo sistema de eixos e motores é maioritariamente constituída por metais condutores. Devido ao facto de as tensões utilizadas no processo de fabrico serem muito elevadas surgem por vezes arcos de campo eléctrico que interferem com o correcto funcionamento do sistema. Dessa forma, conclui-se que o isolamento electromagnético deve ser efectuado cuidadosamente, sob o risco de danificar os dispositivos eléctricos associados.

A possibilidade de modificar os colectores a utilizar durante o fabrico de micro e nanofibras é uma mais-valia para o sistema desenvolvido que facilitam novos ensaios que permitem investigar a morfologia das fibras e os parâmetros de fabrico da electrofiação. Os ensaios e resultados apresentados demonstram que o sistema desenvolvido cumpre o objectivo principal de fabrico de micro e nanofibras por electrofiação.

A ferramenta de desenvolvimento *Visual Studio* revelou ser um *software* acessível e intuitivo, na medida em que proporciona o desenvolvimento de aplicações gráficas através das bibliotecas disponíveis. A comunicação entre o microcontrolador e o computador tornou-se simples de implementar devido às funcionalidades de comunicação série disponíveis no ambiente de desenvolvimento.

Em síntese, o sistema para electrofiação que se desenvolveu é capaz de controlar e monitorizar os dispositivos mas carece de reforço de calibração e melhorias técnicas para garantir a máxima fiabilidade do conjunto.

6.2 Propostas de Trabalho Futuro

Tomando em consideração as ideias fundamentais da dissertação, reconhece-se que estas foram apresentadas e analisadas. No entanto, é imperativa a intenção de testar exaustivamente todos os dispositivos ou equipamentos seleccionados para atestar a competência total das suas funcionalidades e obedecer aos requisitos impostos.

Em primeiro lugar, sugere-se o fabrico de uma caixa protectora e isoladora do sistema de electrofiação de forma a controlar as condições atmosféricas dentro da caixa e, assim, poderem ser tiradas conclusões sobre os efeitos dos diversos parâmetros do processo de electrofiação. Condicionada a atmosfera dentro da câmara de deposição poderão ser adaptados sensores de temperatura, pressão e humidade também monitorizados por computador.

A utilização de tensões na ordem dos quilovolts provoca o surgimento de arcos de campo eléctrico que podem interferir nos dispositivos electromagnéticos utilizados para movimentar os eixos do sistema de posicionamento. Dessa forma, surge a necessidade de isolar cuidadosamente a coluna principal do sistema de posicionamento, assim como os metais utilizados dentro da câmara de deposição.

O movimento dos eixos do sistema de posicionamento desenvolvido é feito com base em correias de plástico que se degradam e deformam com o passar do tempo. Sugere-se que se altere esse sistema para um sistema à base de cremalheiras de forma a reforçar o sistema e melhorar a sua fiabilidade.

O estabelecimento de um modelo matemático universal que represente o comportamento do jacto fibroso, em função das variações aplicadas pelos parâmetros descritos no capítulo 2, constitui um desafio de interesse crescente no seio dos grupos de investigação. Muitos dos protótipos revistos na literatura encontram, numa câmara de vídeo de alta resolução e alta velocidade, uma ferramenta indispensável ao estudo do jacto, uma vez que este se manifesta praticamente invisível ao olho humano. A utilização de uma câmara deste tipo facultaria, aos investigadores, a observação do movimento do jacto electrificado e a possibilidade de estudar a controlabilidade e a repetibilidade desse jacto. A câmara também pode ser utilizada para estudar a forma de deposição das micro e nanofibras.

A automatização e controlo da fonte de alta tensão e da bomba infusora são o próximo passo para o total controlo do sistema de electrofiação e é uma sugestão de trabalho futuro essencial neste projecto.

Sugere-se o desenvolvimento de uma base de dados na qual seja possível fazer o registo automático e a aquisição de dados inerentes aos parâmetros e variáveis do processo, tais como taxa de fluxo da solução polimérica, variação da tensão aplicada, distância da agulha ao alvo ou velocidade de rotação do alvo. O registo manual com um formulário onde seja possível

preencher campos como o polímero e solventes utilizados, a concentração e viscosidade da solução é outra mais-valia a ser implementada futuramente pois permite o agrupamento de dados para posterior análise evitando-se a repetição de erros de execução caso os parâmetros escolhidos não sejam os ideais para as soluções utilizadas.

Por fim, sugere-se tornar a aplicação do computador mais sólida podendo ser adicionada um funcionalidade onde o alvo possa ser movimentado segundo padrões lidos de uma imagem, o que poderia ser utilizado para depositar fibras com padrões como letras ou imagens mais complexas.

Capítulo 7. Bibliografia

- [1] J. P. Canejo, J. P. Borges, M. H. Godinho, P. Brogueira, P. I. C. Teixeira, and E. M. Terentjev, "Helical Twisting of Electrospun Liquid Crystalline Cellulose Micro- and Nanofibers," *Adv Mater*, vol. 20, no. 24, pp. 4821–4825, Dec. 2008.
- [2] D. Li and Y. Xia, "Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel?," *Adv Mater*, vol. 16, no. 14, pp. 1151–1170, 2004.
- [3] "i3N," *i3n.org*. [Online]. Available: <http://www.i3n.org/>. [Accessed: 10-Apr.-2012].
- [4] A. Greiner and J. H. Wendorff, "Electrospinning: A Fascinating Method for the Preparation of Ultrathin Fibers," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 46, no. 30, pp. 5670–5703, Jul. 2007.
- [5] Z.-M. Huang, Y. Z. Zhang, M. Kotaki, and S. Ramakrishna, "A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 15, pp. 2223–2253, Nov. 2003.
- [6] R. Murugan and S. Ramakrishna, "Nano-Featured Scaffolds for Tissue Engineering: A Review of Spinning Methodologies," *Tissue Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 435–447, Mar. 2006.
- [7] I.-D. Kim and A. Rothschild, "Nanostructured metal oxide gas sensors prepared by electrospinning," *Polym Advan Technol*, vol. 22, no. 3, pp. 318–325, 2011.
- [8] M. Rose, B. Boehringer, M. Jolly, R. Fischer, and S. Kaskel, "MOF Processing by Electrospinning for Functional Textiles," *Adv Eng Mater*, vol. 13, no. 4, pp. 356–360, 2011.
- [9] K. Desai, K. Kit, J. Li, P. M. Davidson, S. Zivanovic, and H. Meyer, "Nanofibrous chitosan non-wovens for filtration applications," *Polymer*, vol. 50, no. 15, pp. 3661–3669, 2009.
- [10] K. Choi, "Morfologia e Eficiência de Filtragem de Ar por Materiais Não Trançados Carregados," *Artigo Técnico*, 2008.
- [11] T. Kowalewski and S. NSKI, "Experiments and modelling of electrospinning process," *Technical Sciences*, 2005.
- [12] P. Ducheyne, *Comprehensive Biomaterials*. Elsevier, 2011, p. ii.
- [13] J. D. Schiffman and C. L. Schauer, "A Review: Electrospinning of Biopolymer Nanofibers and their Applications," *Polymer Reviews*, vol. 48, no. 2, pp. 317–352, May 2008.
- [14] A. C. Baptista, J. I. Martins, E. Fortunato, R. Martins, J. P. Borges, and I. Ferreira, "Thin and flexible bio-batteries made of electrospun cellulose-based membranes," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 26, no. 5, pp. 2742–2745, Jan. 2011.

- [15] J. F. De La Mora, "The fluid dynamics of Taylor cones," *Annu Rev Fluid Mech*, 2007.
- [16] N. Datta, "In vitro generated extracellular matrix and fluid shear stress synergistically enhance 3D osteoblastic differentiation," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 103, no. 8, pp. 2488–2493, Feb. 2006.
- [17] J. COOLEY, "Patent US692631 - APPARATUS FOR ELECTRICALLY DISPERSING FLUIDS - Google Patents," U.S. Patent 692,631,1902.
- [18] J. Zeleny, "The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces.," *Phys Rev*, vol. 3, no. 2, pp. 69–91, 1914.
- [19] A. Formhals, "Patent US1975504 - PROCESS AND APPARATUS FOR PBEPABING - Google Patents," U.S. Patent 1,975,504,1934.
- [20] A. Formhals, "Patent US2116942 - METHOD AND APPARATUS FOR THE PRO - Google Patents," U.S. Patent 2,116,942,1938.
- [21] A. Formhals, "Patent US2160962 - METHOD AND APPARATUS FOR SPINNING - Google Patents," U.S. Patent 2,160,962,1939.
- [22] A. Formhals, "Patent US2187306 - A FORMHALS - Google Patents," U.S. Patent 2,187,306,1940.
- [23] G. Taylor, "Disintegration of Water Drops in an Electric Field," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 280, no. 1382, pp. 383–397, Jul. 1964.
- [24] G. Taylor, "Electrically Driven Jets," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 313, no. 1515, pp. 453–475, Dec. 1969.
- [25] P. BAUMGARTEN, "Electrostatic spinning of acrylic microfibers," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 36, no. 1, pp. 71–79, May 1971.
- [26] L. Larrondo, *Electronic Resources Login - Ronald Williams Library - Northeastern Illinois University*.
- [27] I. HAYATI, "Investigations into the mechanisms of electrohydrodynamic spraying of liquids I. Effect of electric field and the environment on pendant drops and factors affecting the formation of stable jets and atomization," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 117, no. 1, pp. 205–221, May 1987.
- [28] J. Doshi, "Electrospinning process and applications of electrospun fibers," *Journal of Electrostatics*, 1995.
- [29] X. Zhang, M. R. Reagan, and D. L. Kaplan, "Electrospun silk biomaterial scaffolds for regenerative medicine," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 61, no. 12, pp. 988–1006, Oct. 2009.
- [30] "BIOFORGE -- Servicios y Productos --," *bioforge.uva.es*. [Online]. Available: <http://www.bioforge.uva.es/old/products.htm>. [Accessed: 24-Feb.-2012].
- [31] "nanofibers,electrospinning,electro-spinning,electrospun,nanospider,nanofiber-Nanofibers Electrospinning Unit from NaBond," *electro-spinning.com*. [Online]. Available: <http://www.electro-spinning.com/?gclid=CLqf1vTvK64CFQcRfAodBQlIKg>. [Accessed: 10-Feb.-2012].
- [32] L. Huang, R. A. McMillan, R. P. Apkarian, B. Pourdeyhi, V. P. Conticello, and E. L. Chaikof, "Generation of Synthetic Elastin-Mimetic Small Diameter Fibers and Fiber Networks," *Macromolecules*, vol. 33, no. 8, pp. 2989–2997, Apr. 2000.
- [33] X. Zong, H. Bien, C. CHUNG, L. Yin, D. Fang, B. HSIAO, B. CHU, and E. ENTCHEVA, "Electrospun fine-textured scaffolds for heart tissue constructs," *Biomaterials*, vol. 26, no. 26, pp. 5330–5338, Sep. 2005.
- [34] H. Yoshimoto, Y. M. Shin, H. Terai, and J. P. Vacanti, "A biodegradable nanofiber scaffold by electrospinning and its potential for bone tissue engineering," *Biomaterials*, vol. 24, no. 12, pp. 2077–2082, May 2003.
- [35] K. Manesh, H. Kim, and P. Santhosh, "ScienceDirect.com - Biosensors and Bioelectronics - A novel glucose biosensor based on immobilization of glucose oxidase into multiwall carbon nanotubes-polyelectrolyte-loaded electrospun nanofibrous membrane," *Biosensors and ...*, 2008.

- [36] M. R. Abidian, D. H. Kim, and D. C. Martin, "Conducting-Polymer Nanotubes for Controlled Drug Release," *Adv Mater*, vol. 18, no. 4, pp. 405–409, Feb. 2006.
- [37] N. Bhardwaj and S. C. Kundu, "Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique," *Biotechnology Advances*, vol. 28, no. 3, pp. 325–347, May 2010.
- [38] R. Nayak, R. Padhye, I. L. Kyratzis, Y. B. Truong, and L. Arnold, "Recent advances in nanofibre fabrication techniques," *Textile Research Journal*, vol. 82, no. 2, pp. 129–147, Jan. 2012.
- [39] C. Binetruy and F. Boussu, *Recent Advances in Textile Composites*. DEStech Publications, Inc, 2010, p. 567.
- [40] C. Kim, Y. CHOI, W. LEE, and K. YANG, "Supercapacitor performances of activated carbon fiber webs prepared by electrospinning of PMDA-ODA poly(amic acid) solutions," *Electrochimica Acta*, vol. 50, no. 2, pp. 883–887, Nov. 2004.
- [41] X.-H. Qin and S.-Y. Wang, "Filtration properties of electrospinning nanofibers," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 102, no. 2, pp. 1285–1290, 2006.
- [42] A. Montefusco, "ScienceDirect.com - Filtration & Separation - The use of Nonwovens in air filtration," *Filtration & separation*, 2005.
- [43] P. Tsai, H. Schreuder-Gibson, and P. Gibson, "Different electrostatic methods for making electret filters," in *Journal of Electrostatics*, 2002, vol. 54, pp. 333–341.
- [44] P. Tsai, "Effect of electrospinning material and conditions upon residual electrostatic charge of polymer nanofibers," *J Textile Apparel*, 2001.
- [45] A. Theron, E. Zussman, and A. L. Yarin, "Electrostatic field-assisted alignment of electrospun nanofibres," *Nanotechnology*, vol. 12, no. 3, pp. 384–390, Aug. 2001.
- [46] A. Greiner, J. H. Wendorff, S. Ramakrishna, and S. Agarwal, *Electrospinning*. Wiley-VCH, 2012, p. 256.
- [47] A. Haghi, "Trends in electrospinning of natural nanofibers - Haghi - 2007 - physica status solidi (a) - Wiley Online Library," *physica status solidi (a)*, 2007.
- [48] S. Sukigara, M. Gandhi, J. Ayutsede, M. Micklus, and F. Ko, "Regeneration of Bombyx mori silk by electrospinning—part 1: processing parameters and geometric properties," *Polymer*, vol. 44, no. 19, pp. 5721–5727, Sep. 2003.
- [49] C. Ki, D. Baek, K. Gang, K. Lee, and I. Um, "ScienceDirect.com - Polymer - Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin–formic acid solution," *Polymer*, 2005.
- [50] P. Gupta, C. Elkins, T. E. Long, and G. L. Wilkes, "Electrospinning of linear homopolymers of poly(methyl methacrylate): exploring relationships between fiber formation, viscosity, molecular weight and concentration in a good solvent," *Polymer*, vol. 46, no. 13, pp. 4799–4810, Jun. 2005.
- [51] C. Burger, B. S. Hsiao, and B. Chu, "NANOFIBROUS MATERIALS AND THEIR APPLICATIONS," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 36, no. 1, pp. 333–368, Aug. 2006.
- [52] L. Larrondo, "Electrostatic fiber spinning from polymer melts. I. Experimental observations on fiber formation and properties - Larrondo - 2003 - Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition - Wiley Online Library," *Journal of Polymer Science: ...*, 1981.
- [53] J. M. Deitzel, J. Kleinmeyer, D. Harris, and N. C. Beck Tan, "The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles," *Polymer*, vol. 42, no. 1, pp. 261–272, Jan. 2001.
- [54] M. M. Hohman, M. Shin, G. Rutledge, and M. P. Brenner, "Electrospinning and electrically forced jets. II. Applications," *Phys. Fluids*, vol. 13, no. 8, pp. 2221–2236, 2001.
- [55] C. Zhang, X. Yuan, L. Wu, Y. Han, and J. Sheng, "Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats," *European Polymer Journal*, vol. 41, no. 3, pp. 423–432, Mar. 2005.
- [56] H. Fong, I. Chun, and D. H. Reneker, "Beaded nanofibers formed during electrospinning," *Polymer*, vol. 40, no. 16, pp. 4585–4592, Jul. 1999.
- [57] D. Reneker and I. Chun, *Reneker: Carbon Nanotubes on Carbon Nanofibers: A...* - Google Scholar. Nanotechnology, 1996.
- [58] O. Yördem and M. Papila, "ScienceDirect.com - Materials & Design - Effects of

- electrospinning parameters on polyacrylonitrile nanofiber diameter: An investigation by response surface methodology," *Materials & design*, 2008.
- [59] X. Yuan, Y. Zhang, C. Dong, and J. Sheng, "Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning," *Polym. Int.*, vol. 53, no. 11, pp. 1704–1710, Sep. 2004.
- [60] X. Zong, K. Kim, D. Fang, S. Ran, B. S. Hsiao, and B. Chu, "Structure and process relationship of electrospun bioabsorbable nanofiber membranes," *Polymer*, vol. 43, no. 16, pp. 4403–4412, Jul. 2002.
- [61] B. Kim, H. Park, S.-H. Lee, and W. M. Sigmund, "Poly(acrylic acid) nanofibers by electrospinning," *Mater Lett*, vol. 59, no. 7, pp. 829–832, Mar. 2005.
- [62] W. Zuo, M. Zhu, W. Yang, H. Yu, Y. Chen, and Y. Zhang, "Experimental study on relationship between jet instability and formation of beaded fibers during electrospinning," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 45, no. 5, pp. 704–709, 2005.
- [63] C. Mit-uppatham, M. Nithitanakul, and P. Supaphol, "Ultrafine Electrospun Polyamide-6 Fibers: Effect of Solution Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter," *Macromol. Chem. Phys.*, vol. 205, no. 17, pp. 2327–2338, Nov. 2004.
- [64] C. L. Casper, J. S. Stephens, N. G. Tassi, D. B. Chase, and J. F. Rabolt, "Controlling Surface Morphology of Electrospun Polystyrene Fibers: Effect of Humidity and Molecular Weight in the Electrospinning Process," *Macromolecules*, vol. 37, no. 2, pp. 573–578, Jan. 2004.
- [65] S. Liao, G. Xu, W. Wang, F. Watari, and F. Cui, "Self-assembly of nano-hydroxyapatite on multi-walled carbon nanotubes," *Acta ...*, 2007.
- [66] W. E. Teo and S. Ramakrishna, "A review on electrospinning design and nanofibre assemblies," *Nanotechnology*, vol. 17, no. 14, pp. R89–R106, Jun. 2006.
- [67] J. G. Canejo, "Hélices e espirais em cristais líquidos celulósicos," pp. 1–201, Nov. 2011.
- [68] "An introduction to electrospinning and nanofibers - Seeram Ramakrishna - Google Livros," *google.pt*. [Online]. Available: http://www.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=QHkyRdb2TicC&oi=fnd&pg=PP1&dq=ramakrishna+an+introduction+to+electrospinning+and+nanofibers&ots=AwHXZqQasW&sig=-MBStKAYprAxd9xXNHPnYypMUB4&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true. [Accessed: 24-Mar.-2012].
- [69] "nanolab.me.cmu.edu/publications/papers/Nain-IEEETransNano2006.pdf," *nanolab.me.cmu.edu*. [Online]. Available: <http://nanolab.me.cmu.edu/publications/papers/Nain-IEEETransNano2006.pdf>. [Accessed: 28-Mar.-2012].
- [70] "Super-Hydrophobic Surface of Aligned Polyacrylonitrile Nanofibers - Feng - 2002 - Angewandte Chemie - Wiley Online Library," *onlinelibrary.wiley.com*. [Online]. Available: [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1521-3757\(20020402\)114:7%3C1269::AID-ANGE1269%3E3.0.CO;2-E/pdf](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1521-3757(20020402)114:7%3C1269::AID-ANGE1269%3E3.0.CO;2-E/pdf). [Accessed: 28-Mar.-2012].
- [71] P. Ma and R. Zhang, "Synthetic nano-scale fibrous extracellular matrix," *J Biomed Mater Res*, vol. 46, no. 1, pp. 60–72, 1999.
- [72] "ScienceDirect.com - Biotechnology Advances - Role of biomaterials, therapeutic molecules and cells for hepatic tissue engineering," *sciencedirect.com*. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975012000067>. [Accessed: 29-Mar.-2012].
- [73] *laboratorytalk.com*, *laboratorytalk.com*. [Online]. Available: <http://www.laboratorytalk.com>. [Accessed: 29-Mar.-2012].
- [74] "iopscience.iop.org/1468-6996/9/1/014109/pdf/1468-6996_9_1_014109.pdf," *iopscience.iop.org*. [Online]. Available: http://iopscience.iop.org/1468-6996/9/1/014109/pdf/1468-6996_9_1_014109.pdf. [Accessed: 29-Mar.-2012].
- [75] "Arduino - HomePage," *arduino.cc*. [Online]. Available: <http://arduino.cc/>. [Accessed: 16-Mar.-2012].
- [76] "Processing.org," *processing.org*. [Online]. Available: <http://processing.org/>. [Accessed: 16-Mar.-2012].

- [77] "AccelStepper: AccelStepper library for Arduino," *open.com.au*. [Online]. Available: <http://www.open.com.au/mikem/arduino/AccelStepper/>. [Accessed: 21-Apr.-2012].
- [78] D. Grafahrend, K.-H. Heffels, M. V. Beer, P. Gasteier, M. Möller, G. Boehm, P. D. Dalton, and J. Groll, "Degradable polyester scaffolds with controlled surface chemistry combining minimal protein adsorption with specific bioactivation," *Nat Mater*, vol. 10, no. 1, pp. 67–73, Dec. 2010.
- [79] S. Suganya, T. Senthil Ram, B. S. Lakshmi, and V. R. Giridev, "Herbal drug incorporated antibacterial nanofibrous mat fabricated by electrospinning: An excellent matrix for wound dressings," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 121, no. 5, pp. 2893–2899, Mar. 2011.
- [80] "<https://www.donaldson.com/en/filtermedia/support/datalibrary/052022.pdf>," *donaldson.com*. [Online]. Available: <https://www.donaldson.com/en/filtermedia/support/datalibrary/052022.pdf>. [Accessed: 21-Apr.-2012].
- [81] "Application of Nanofiber Technology to Nonwoven Thermal Insulation," Nov. 2006.

Capítulo 8. Anexos

8.1 Anexo I – Código-fonte do microcontrolador Arduino

```

1  #include <AccelStepper.h>
2
3  /* SERIAL MOTOR
4   * Envia e recebe mensagens via porta serie
5   *
6   * Aplicação de interface em C#
7   * Comunicação com os motores de passo através do arduino
8   * Comunicação com o motor DC via arduino
9   * Comunicação com interface em C# via porta série
10  */
11
12  #define BAUD_RATE 9600
13  #define TERM_CHAR '\n'
14  #define BUF_LEN 2048
15  #define bitSensor 23
16  #define min_steps 0
17  #define dcMotorStepPin 8
18  #define dcMotorDirectionPin 9
19  #define relayPin 35
20  #define columns 10
21  #define lines 20
22  #define MAXSPEED 500
23  #define dcMotorSpeedPin 21
24
25  AccelStepper stepperX(1,2,3); /*pin 1 = 1 - Stepper with driver
26                               pin 2 - Step
27                               pin 3 - Direction */
28  AccelStepper stepperY(1,4,5);
29  AccelStepper stepperZ(1,6,7);
30
31  int actions[lines][columns];
32  int numActions = 0;
33  int currentAction = 0;
34  int repeats[lines];
35  int numRepeats = 0;
36  boolean ExecutingPlan = false;
37  boolean receiving = false;
38  boolean MANUAL = false;
39  boolean MOTORSENABLE = false;
40  char incomingChar, buf[BUF_LEN];
41  unsigned long previousMillis = 0;
42  long waitMillis = 300000; // 5 minutes
43  int MotorStopped = 0;
44  int DcMotorSpeed = 0;
45  unsigned long previousMillisDCMotor = 0;
46  int DCMotorON = 0;
47  int CurrentPosition[3];
48
49  volatile int sensors = 0;
50  volatile int sensores = 0;
51  int oldSensors = 0;
52  int i = 0;
53  int max_stepX = 0;
54  int max_stepY = 0;
55  int max_stepZ = 0;
56
57  boolean MoveX = true;
58  boolean MoveY = true;
59  boolean MoveZ = true;
60
61  void setup(){
62    Serial.begin(BAUD_RATE);
63    //clean buffer
64    memset(buf, '\0', BUF_LEN);
65    //i = 0;
66    // Associa as portas dos sensores optoelectronicos
67    for (int i = 0; i < 6; i++){
68      pinMode(bitSensor+(2*i), INPUT);
69    }
70    for (int i = 0; i < lines; i++)
71      for (int j = 0; j < columns; j++)
72        actions[i][j] = 0;
73
74    // liga as rotinas de interrupt dos sensores limite
75    attachInterrupt(5,readSX,CHANGE); //PIN 18
76    attachInterrupt(4,readSY,CHANGE); //PIN 19
77    attachInterrupt(3,readSZ,CHANGE); //PIN 20
78
79    // Inverte a polaridade de direcao dos eixos Y e Z
80    stepperY.setPinsInverted(true,false,false);
81    stepperZ.setPinsInverted(true,false,false);
82    // Inicia os motores de passo
83    stepperX.setMaxSpeed(MAXSPEED);

```

```

84     stepperX.setSpeed(0);
85     stepperY.setMaxSpeed(MAXSPEED);
86     stepperY.setSpeed(0);
87     stepperZ.setMaxSpeed(MAXSPEED);
88     stepperZ.setSpeed(0);
89
90     // Define a posição inicial como (-1,-1,-1) para a aplicação no PC saber que os motores têm que ser iniciados
91     stepperX.setCurrentPosition(-1);
92     stepperY.setCurrentPosition(-1);
93     stepperZ.setCurrentPosition(-1);
94     SetCurrentPosition();
95     //DC MOTOR CONFIGURATION
96     pinMode(dcMotorStepPin,OUTPUT);
97     pinMode(dcMotorDirectionPin,OUTPUT);
98     pinMode(relayPin,OUTPUT);
99     digitalWrite(dcMotorDirectionPin,LOW); //HIGH
100    analogWrite(dcMotorStepPin,0);
101    //digitalWrite(relayPin,HIGH);
102    //testDCMotor();
103    sensores = readSensors();
104    delay(1000);
105 }
106
107 void loop(){
108
109     readSerial();
110     preventDerailment();
111     turnOffMotors();
112     SetCurrentPosition();
113     SendRPMs();
114
115     if (ExecutingPlan == true){
116         ExecutePlan();
117     }
118     // Stepper axis X Movement
119     if (MOTORSENABLE == true){
120         if((stepperX.speed() != 0) && MoveX){
121             if (MANUAL)
122                 stepperX.runSpeed();
123             else
124                 stepperX.run();
125         }
126
127         // Stepper axis Y Movement
128         if((stepperY.speed() != 0) && MoveY){
129             if (MANUAL)
130                 stepperY.runSpeed();
131             else
132                 stepperY.run();
133         }
134
135         // Stepper axis Z Movement
136         if((stepperZ.speed() != 0) && MoveZ){
137             if (MANUAL)
138                 stepperZ.runSpeed();
139             else
140                 stepperZ.run();
141         }
142     }
143
144     /*if (stepperX.currentPosition() != stepperX.targetPosition())
145         stepperX.run();
146     if (stepperY.currentPosition() != stepperY.targetPosition())
147         stepperY.run();
148     if (stepperZ.currentPosition() != stepperZ.targetPosition())
149         stepperZ.run();*/
150 }
151
152 void readSX(){
153     sensores = readSensors();
154 }
155
156 void readSY(){
157     sensores = readSensors();
158 }
159
160 void readSZ(){
161     sensores = readSensors();
162 }
163
164 void SetCurrentPosition(){
165     CurrentPosition[0] = stepperX.currentPosition();
166     CurrentPosition[1] = stepperY.currentPosition();

```

```

167     CurrentPosition[2] = stepperZ.currentPosition();
168 }
169
170 void readSerial(){
171     while(Serial.available() > 0){ //Atencao ao tamanho do buffer 128
172         incomingChar = (char) Serial.read();
173         if(incomingChar == '<' && receiving == false){ // 2 = 'STX'
174             receiving = true;
175             //clean buffer
176             memset(buf, '\0', BUF_LEN);
177             i = 0;
178         }
179         else if(incomingChar == '>' && receiving == true){ // 3 = 'ETX'
180             receiving = false;
181             //Decode msg
182             Decode_msg(buf);
183             break;
184         }
185         else if (receiving == true && i != BUF_LEN){
186             buf[i] = incomingChar;
187             i++;
188         }
189         delay(1); // wait for another byte
190     }
191 }
192
193 int readSensors(){
194     int sensorValue = 0;
195     int sensores1 = 0;
196     for(int i = 0; i < 6; i++){
197         sensorValue = digitalRead(bitSensor+(2*i));
198         bitWrite(sensores1,i,sensorValue);
199     }
200     return sensores1;
201 }
202
203 void calibracao(){
204     Serial.println("Inicio da calibracao....");
205     //Calibração do eixo X
206     stepperX.setMaxSpeed(MAXSPEED);
207     stepperX.setSpeed(-50);
208     while(bitRead(sensores,0) == 1){
209         stepperX.runSpeed();
210     }
211     stepperX.setCurrentPosition(0);
212     delay(500);
213     stepperX.setSpeed(50);
214     while(bitRead(sensores,1) == 1){
215         stepperX.runSpeed();
216     }
217     max_stepX = stepperX.currentPosition();
218     delay(500);
219     stepperX.setSpeed(0);
220     Serial.print("STEPS X: ");
221     Serial.println(max_stepX);
222     Serial.println("Eixo X calibrado...");
223
224     //Calibração do eixo Y
225     stepperY.setMaxSpeed(MAXSPEED);
226     stepperY.setSpeed(-50);
227     while(bitRead(sensores,2) == 1){
228         stepperY.runSpeed();
229     }
230     stepperY.setCurrentPosition(0);
231     delay(500);
232     stepperY.setSpeed(50);
233     while(bitRead(sensores,3) == 1){
234         stepperY.runSpeed();
235     }
236     max_stepY = stepperY.currentPosition();
237     delay(500);
238     stepperY.setSpeed(0);
239     Serial.print("STEPS Y: ");
240     Serial.println(max_stepY);
241     Serial.println("Eixo Y calibrado...");
242
243     //Calibração do eixo Z
244     stepperZ.setMaxSpeed(MAXSPEED);
245     stepperZ.setSpeed(-300);
246     while(bitRead(sensores,4) == 1){
247         stepperZ.runSpeed();
248     }
249     stepperZ.setCurrentPosition(0);

```



```

250     delay(500);
251     stepperZ.setSpeed(300);
252     while(bitRead(sensores,5) == 1){
253         stepperZ.runSpeed();
254     }
255     max_stepZ = stepperZ.currentPosition();
256     delay(1500);
257     stepperZ.setSpeed(0);
258     Serial.print("STEPS Z: ");
259     Serial.println(max_stepZ);
260     Serial.println("Eixo Z calibrado...");
261
262
263
264     // Enviar max_steps para interface
265     // .....
266     Serial.println("A mover para o meio...");
267     //Colocação do motor numa posição central
268     stepperX.setMaxSpeed(50);
269     stepperX.setAcceleration(50.0);
270     stepperX.moveTo(max_stepX/2);
271
272     stepperY.setMaxSpeed(50);
273     stepperY.setAcceleration(50.0);
274     stepperY.moveTo(max_stepY/2);
275
276     stepperZ.setMaxSpeed(300);
277     stepperZ.setAcceleration(50.0);
278     stepperZ.moveTo(max_stepZ/2);
279
280     boolean fim = true;
281     while (fim){
282         if (stepperX.currentPosition() != stepperX.targetPosition())
283             stepperX.run();
284         if (stepperY.currentPosition() != stepperY.targetPosition())
285             stepperY.run();
286         if (stepperZ.currentPosition() != stepperZ.targetPosition())
287             stepperZ.run();
288
289         if ((stepperX.currentPosition() == stepperX.targetPosition()) && (stepperY.currentPosition() == stepperY.targetPosition()) && (stepperZ.currentPosition() ==
290 stepperZ.targetPosition()))
291             fim = false;
292     }
293     Serial.print("<1,");
294     Serial.print(max_stepX);
295     Serial.print(",");
296     Serial.print(max_stepY);
297     Serial.print(",");
298     Serial.print(max_stepZ);
299     Serial.println(">");
300     Serial.println("<5,1>");
301     Serial.println("Calibração efectuada");
302 }
303
304 // Test the behavior of DC MOTOR
305 void testDCMotor(){
306     for (int i = 0; i < 13; i++){
307         analogWrite(dcMotorStepPin,i*20);
308         delay(3000);
309     }
310     analogWrite(dcMotorStepPin,0);
311     digitalWrite(dcMotorDirectionPin,HIGH);
312     for (int i = 0; i < 13; i++){
313         analogWrite(dcMotorStepPin,i*20);
314         delay(3000);
315     }
316     analogWrite(dcMotorStepPin,0);
317     digitalWrite(dcMotorDirectionPin,LOW);
318     Serial.println("DC Motor test successfull!");
319 }
320
321 void Decode_msg(char *msg){
322     char *comando;
323     int valores[lines][columns];
324
325     for (int i = 0; i < lines; i++)
326         for (int j = 0; j < columns; j++)
327             valores[i][j] = 0;
328
329     int i = 0;
330     int j = 0;
331     int action = atoi(strtok_r(msg, ";", &msg));
332     int num_actions = atoi(strtok_r(msg, ";", &msg));

```

```

333 // Separa a string em inteiros separados por ";"
334 while ((comando = strtok_r(msg, ";", &msg)) != NULL){
335     Serial.println(comando);
336     valores[j][i] = atoi(comando);
337     i++;
338     if (i == 10){
339         j++;
340         i = 0;
341     }
342     //msg = NULL;
343 }
344 // Executa o comando pedido (valores[0])
345 switch (action){
346     case 1:
347         moveManual(valores[0][0],valores[0][1]);
348         break;
349     case 2:
350         moveToPosition(valores[0][0],valores[0][1], valores[0][2], valores[0][3], valores[0][4], valores[0][5], valores[0][6], valores[0][7], valores[0][8]);
351         break;
352     case 3:
353         MANUAL = valores[0][0];
354         break;
355     case 4:
356         resetSteppers();
357         break;
358     case 5:
359         calibracao();
360         break;
361     case 6:
362         // disable/enable MOTORS
363         enableMotors(valores[0][0]);
364         break;
365     case 7:
366         // Returns Motors' current position
367         ReturnMotorsPosition();
368         break;
369     case 8:// EXECUTE PLAN
370         for (int i = 0; i < lines; i++)
371             for (int j = 0; j < columns; j++)
372                 actions[i][j] = valores[i][j];
373         numActions = num_actions;
374         ExecutingPlan = true;
375         currentAction = 0;
376         ReadAction();
377         //ExecutePlan();
378         //Serial.println("Plan Execution Completed.");
379         break;
380     case 9:
381         moveRelPosition(valores[0][0],valores[0][1], valores[0][2], valores[0][3], valores[0][4], valores[0][5], valores[0][6], valores[0][7], valores[0][8]);
382         break;
383     case 10:
384         StopPlan();
385         break;
386     case 11:
387         //Stop All Motors
388         StopMotors();
389         break;
390     case 12:
391         //resetMaxSteps(valores[1],valores[2],valores[3]);
392         break;
393     default:
394         break;
395 }
396 }
397
398 void ExecutePlan(){
399     // for (int i = 0; i < numActions; i++){
400     //     for (int j = 0; j < columns; j++){
401     //         Serial.print(actions[i][j]);
402     //         Serial.print(",");
403     //     }
404     //     Serial.println();
405     // }
406     // if (actions[currentAction] == 4){
407     //     stepperX.setSpeed(0);
408     //     s
409     // }
410     if ((stepperX.distanceToGo() == 0) && (stepperY.distanceToGo() == 0) && (stepperZ.distanceToGo() == 0)){
411         currentAction++;
412         if (currentAction >= numActions){
413             StopPlan();
414         }else{
415             ReadAction();

```

```

416     }
417 }
418 }
419
420 void StopPlan(){
421     ExecutingPlan = false;
422     currentAction = 0;
423     for (int i = 0; i < lines; i++)
424         for (int j = 0; j < columns; j++)
425             actions[i][j] = 0;
426     for (int i = 0; i < lines; i++)
427         repeats[i] = 0;
428     numRepeats = 0;
429     //Stop Motors
430     // stepperX.moveTo(stepperX.currentPosition());
431     // stepperY.moveTo(stepperY.currentPosition());
432     // stepperZ.moveTo(stepperZ.currentPosition());
433     StopMotors();
434     Serial.println("<10,1>");
435     Serial.println("Plano de Execucao finalizado.");
436 }
437
438 void StopMotors(){
439     stepperX.setSpeed(0);
440     stepperY.setSpeed(0);
441     stepperZ.setSpeed(0);
442     analogWrite(dcMotorStepPin,0);
443     DcMotorSpeed = 0;
444 }
445
446 void ReadAction(){
447     switch (actions[currentAction][0]){
448     case 1:
449
450     moveToPosition(actions[currentAction][1],actions[currentAction][2],actions[currentAction][3],actions[currentAction][4],actions[currentAction][5],actions[currentAction][6],actions
451     [currentAction][7],actions[currentAction][8],actions[currentAction][9]);
452         break;
453     case 2:
454
455     moveRelPosition(actions[currentAction][1],actions[currentAction][2],actions[currentAction][3],actions[currentAction][4],actions[currentAction][5],actions[currentAction][6],action
456     s[currentAction][7],actions[currentAction][8],actions[currentAction][9]);
457         break;
458     case 3:
459         delay(actions[currentAction][1]);
460         break;
461     case 4:
462         repeats[numRepeats] = currentAction;
463         numRepeats++;
464         break;
465     case 5:
466         if (actions[currentAction][1] != -1){
467             actions[currentAction][1]--;
468         }
469         if (actions[currentAction][1] == 0){
470             currentAction = repeats[numRepeats-1];
471         }else if (actions[currentAction][1] == 0){
472             numRepeats--;
473         }
474         break;
475     case 6:
476         moveManual(actions[currentAction][1],actions[currentAction][2]);
477         break;
478     }
479 }
480 void preventDerailment(){
481     //Prevent Derailmente axis X
482     if ((bitRead(sensores,0) == 0) && (stepperX.speed() < 0)){
483         MoveX = false;
484         stepperX.moveTo(stepperX.currentPosition());
485     }else if((bitRead(sensores,1) == 0) && (stepperX.speed() > 0)){
486         MoveX = false;
487         stepperX.moveTo(stepperX.currentPosition());
488     }else {
489         MoveX = true;
490     }
491
492     //Prevent Derailmente axis Y
493     if ((bitRead(sensores,2) == 0) && (stepperY.speed() < 0)){
494         MoveY = false;
495         stepperY.moveTo(stepperY.currentPosition());
496     }else if((bitRead(sensores,3) == 0) && (stepperY.speed() > 0)){
497         MoveY = false;
498         stepperY.moveTo(stepperY.currentPosition());

```

```

499     }else {
500         MoveY = true;
501     }
502
503     //Prevent Derailmente axis Z
504     if ((bitRead(sensores,4) == 0) && (stepperZ.speed() < 0)){
505         MoveZ = false;
506         stepperZ.moveTo(stepperZ.currentPosition());
507     }else if((bitRead(sensores,5) == 0) && (stepperZ.speed() > 0)){
508         MoveZ = false;
509         stepperZ.moveTo(stepperZ.currentPosition());
510     }else {
511         MoveZ = true;
512     }
513
514 }
515
516 void moveManual(int motor, int velocidad){
517     switch (motor){
518         case 1:
519             stepperX.setMaxSpeed(MAXSPEED);
520             stepperX.setSpeed(velocidad);
521             break;
522         case 2:
523             stepperY.setMaxSpeed(MAXSPEED);
524             stepperY.setSpeed(velocidad);
525             break;
526         case 3:
527             stepperZ.setMaxSpeed(MAXSPEED);
528             stepperZ.setSpeed(velocidad);
529             break;
530         case 4:
531             digitalWrite(dcMotorDirectionPin,LOW); //HIGH
532             analogWrite(dcMotorStepPin,velocidad);
533             DcMotorSpeed = velocidad;
534             break;
535         case 5:
536             digitalWrite(dcMotorDirectionPin,HIGH); //HIGH
537             analogWrite(dcMotorStepPin,velocidad);
538             DcMotorSpeed = velocidad;
539             break;
540     }
541 }
542
543 void resetSteppers(){
544     stepperX.setMaxSpeed(MAXSPEED);
545     stepperX.setSpeed(-30);
546     stepperY.setMaxSpeed(MAXSPEED);
547     stepperY.setSpeed(-50);
548     stepperZ.setMaxSpeed(MAXSPEED);
549     stepperZ.setSpeed(-300);
550     while(((bitRead(sensores,0) == 1) || (bitRead(sensores,2) == 1) || (bitRead(sensores,4) == 1)){
551         if (bitRead(sensores,0) == 1)
552             stepperX.runSpeed();
553         if (bitRead(sensores,2) == 1)
554             stepperY.runSpeed();
555         if (bitRead(sensores,4) == 1)
556             stepperZ.runSpeed();
557     }
558     stepperX.setSpeed(0);
559     stepperY.setSpeed(0);
560     stepperZ.setSpeed(0);
561
562     stepperX.setCurrentPosition(0);
563     stepperY.setCurrentPosition(0);
564     stepperZ.setCurrentPosition(0);
565     SetCurrentPosition();
566     delay(500);
567     ReturnMotorsPosition();
568     Serial.println("<4,1>");
569     Serial.println("Reset DONE");
570 }
571
572 void moveToPosition(float positionX, float speedX, float AccelX, float positionY, float speedY, float AccelY, float positionZ, float speedZ, float AccelZ){
573     if (AccelX == 0){
574         if (positionX < stepperX.currentPosition()){
575             stepperX.setMaxSpeed(MAXSPEED);
576             stepperX.setSpeed(-speedX);
577         }else{
578             stepperX.setMaxSpeed(MAXSPEED);
579             stepperX.setSpeed(speedX);
580         }
581     }

```

```

582     }else{
583         stepperX.setMaxSpeed(speedX);
584         stepperX.setAcceleration(AccelX);
585     }
586     if (AccelY == 0){
587         if (positionY < stepperY.currentPosition()){
588             stepperY.setMaxSpeed(MAXSPEED);
589             stepperY.setSpeed(-speedY);
590         }else{
591             stepperY.setMaxSpeed(MAXSPEED);
592             stepperY.setSpeed(speedY);
593         }
594     }else{
595         stepperY.setMaxSpeed(speedY);
596         stepperY.setAcceleration(AccelY);
597     }
598     if (AccelZ == 0){
599         if (positionZ < stepperZ.currentPosition()){
600             stepperZ.setMaxSpeed(MAXSPEED);
601             stepperZ.setSpeed(-speedZ);
602         }else{
603             stepperZ.setMaxSpeed(MAXSPEED);
604             stepperZ.setSpeed(speedZ);
605         }
606     }else{
607         stepperZ.setMaxSpeed(speedZ);
608         stepperZ.setAcceleration(AccelZ);
609     }
610
611     stepperX.moveTo(positionX);
612     stepperY.moveTo(positionY);
613     stepperZ.moveTo(positionZ);
614 }
615
616 void moveRelPosition(float positionX, float speedX, float AccelX, float positionY, float speedY, float AccelY, float positionZ, float speedZ, float AccelZ){
617     if (AccelX == 0){
618         if (positionX < 0){
619             stepperX.setMaxSpeed(MAXSPEED);
620             stepperX.setSpeed(-speedX);
621         }else{
622             stepperX.setMaxSpeed(MAXSPEED);
623             stepperX.setSpeed(speedX);
624         }
625     }else{
626         stepperX.setMaxSpeed(speedX);
627         stepperX.setAcceleration(AccelX);
628     }
629 }
630     if (AccelY == 0){
631         if (positionY < 0){
632             stepperY.setMaxSpeed(MAXSPEED);
633             stepperY.setSpeed(-speedY);
634         }else{
635             stepperY.setMaxSpeed(MAXSPEED);
636             stepperY.setSpeed(speedY);
637         }
638     }else{
639         stepperY.setMaxSpeed(speedY);
640         stepperY.setAcceleration(AccelY);
641     }
642     if (AccelZ == 0){
643         if (positionZ < 0){
644             stepperZ.setMaxSpeed(MAXSPEED);
645             stepperZ.setSpeed(-speedZ);
646         }else{
647             stepperZ.setMaxSpeed(MAXSPEED);
648             stepperZ.setSpeed(speedZ);
649         }
650     }else{
651         stepperZ.setMaxSpeed(speedZ);
652         stepperZ.setAcceleration(AccelZ);
653     }
654
655     stepperX.move(positionX);
656     stepperY.move(positionY);
657     stepperZ.move(positionZ);
658 }
659
660 void enableMotors(int option){
661     switch (option){
662     case 0:
663         // Disable Motors
664         analogWrite(dcMotorStepPin,0);

```

```

665     digitalWrite(relayPin,LOW);
666     MOTORSENABLE = false;
667     Serial.println("<6,0>");
668     break;
669 case 1:
670     // Enable Motors
671     digitalWrite(relayPin,HIGH);
672     MOTORSENABLE = true;
673     Serial.println("<6,1>");
674     break;
675 case 2:
676     if (MOTORSENABLE){
677         Serial.println("<6,1>");
678     }else{
679         Serial.println("<6,0>");
680     }
681     break;
682 }
683 delay(500);
684 }
685
686 void turnOffMotors(){
687     unsigned long currentMillis = millis();
688
689     //Se os 4 motores estiverem parados então começa a contar tempo
690     if ((stepperX.speed() == 0) && (stepperY.speed() == 0) && (stepperZ.speed() == 0) /*&& (DcMotorSpeed == 0)*/){
691         if (MotorStopped == 0){
692             previousMillis = currentMillis;
693             MotorStopped = 1;
694         } else if (MotorStopped == 1){
695             if ((currentMillis - previousMillis >= 250) && (currentMillis - previousMillis < 255)){
696                 ReturnMotorsPosition();
697             }
698             if (currentMillis - previousMillis > waitMillis){
699                 //enableMotors(0);
700                 MOTORSENABLE = false;
701                 Serial.println("<6,0>");
702                 Serial.println("ATENÇÃO! POSITIONAL MOTORS DISABLED!");
703                 MotorStopped = 2;
704             }
705         }
706     } else {
707         MotorStopped = 0;
708     }
709 }
710
711 void ReturnMotorsPosition(){
712     Serial.print("<2,");
713     Serial.print(CurrentPosition[0]);
714     Serial.print(",");
715     Serial.print(CurrentPosition[1]);
716     Serial.print(",");
717     Serial.print(CurrentPosition[2]);
718     Serial.println(">");
719 }
720 int getRPMs(){
721     #define SAMPLES 36
722     double freq = 0;
723     for (unsigned int j = 0; j < SAMPLES; j++){
724         freq += 1/(pulseIn(dcMotorSpeedPin,HIGH)*2*pow(10,-3));
725     }
726     return freq*60;
727 }
728 void SendRPMs(){
729     unsigned long currentMillis = millis();
730     if (MotorStopped > 0){
731         if (DcMotorSpeed != 0){
732             if (DCMotorON == 0){
733                 previousMillisDCMotor = currentMillis;
734                 DCMotorON = 1;
735             }else if (DCMotorON == 1){
736                 //Se já tiverem passado 2 segundos envia velocidade do motor para a interface
737                 if (currentMillis - previousMillisDCMotor >= 2000){
738                     int RPMs = getRPMs();
739                     Serial.print("<3,");
740                     Serial.print(RPMs);
741                     Serial.println(">");
742                     DCMotorON = 0;
743                 }
744             }
745         }
746     }

```